

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Cartagena



Proyecto Final de Carrera

Instalación y puesta en marcha de un pequeño Radiotelescopio en la Universidad Politécnica de Cartagena

Autor: Jesús Mora Rodríguez
Director: José Luis Gómez Tornero

Febrero de 2009



Autor	Jesús Mora Rodríguez
E-mail del Autor	jemorobig@gmail.com
Director(es)	José Luis Gómez Tornero
E-mail del Director	josel.gomez@upct.es
Título del PFC	Instalación y puesta en marcha de un pequeño Radiotelescopio en la Universidad Politécnica de Cartagena
Descriptores	
Resumen	<p>Este Proyecto Final de Carrera forma parte de un proyecto de mayor magnitud con el que se pretende instalar un pequeño radiotelescopio en la UPCT para observar la radiación de hidrógeno atómico del Universo. Este proyecto en concreto consiste en la instalación y puesta en marcha del mismo. Además, se ha colaborado en el diseño y fabricación de un receptor-entrenador de microondas que se empleará como herramienta docente con la que alumnos y resto de público pueda visualizar y entender el procesado hardware que experimenta la señal de microondas desde que es recibida del espacio por la antena hasta que es digitalizada y procesada por un ordenador.</p>
Titulación	Ingeniero de Telecomunicación
Intensificación	Sistemas y Redes de Telecomunicación
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación	Febrero de 2009

A mis padres...

Agradecimientos

Resulta complicado expresar en pocas líneas el profundo agradecimiento que siento por aquellas personas que han hecho posible la realización de este proyecto final de carrera (en adelante, PFC).

Quiero comenzar por mi director de proyecto, José Luis Gómez Tornero, a quien admiro y estimo. Cuando a principio de curso fui a su despacho para informarle de que estaba interesado en realizar alguna de sus propuestas de PFC, lo hice pensando en que con él como director, no me faltaría ni ayuda, ni apoyo, ni conocimientos. No me equivocaba.

José Luis, eres un gran profesor y una gran persona, tienes algo que te diferencia del resto. Desde aquí y de verdad, gracias.

También, quiero agradecer toda la ayuda y apoyo que el profesor David Cañete Rebenaque me ha brindado. Recordaré esos viajes a Valencia, sus lecciones sobre cómo manejar el analizador de espectros y redes vectoriales y la forma de fabricar en microstrip.

Aunque no se citen, también quiero dar las gracias a aquellos profesores y resto de personal que, con su colaboración en éste y en anteriores proyectos, están haciendo del Radiotelescopio de la UPCT una realidad.

Este PFC forma parte de un proyecto de mayor magnitud, en el que otros alumnos de la Universidad Politécnica de Cartagena se han visto implicados estos últimos años. Para el diseño del receptor-entrenador de microondas a 1420 MHz, he empleado los amplificadores, el mezclador y el oscilador que estos alumnos diseñaron como PFC. Sin sus diseños, mi tarea habría sido algo inabordable. A todos ellos, gracias.

Merece una mención especial Marta Rodríguez García, antes compañera de carrera, ahora amiga. Con ella he trabajado conjuntamente en distintos aspectos de mi proyecto. Ha sido un placer haberte conocido y tenerte como compañera, desde aquí y de verdad, gracias.

Al principio de trabajar en este proyecto, cuando apenas tenía conocimientos sobre las necesidades que se tenía para poner en marcha un radiotelescopio, realizamos una visita a la facultad de Física de la Universidad de Valencia, donde tenían instalado un pequeño radiotelescopio de características similares al de la UPCT. Allí nos enseñaron sus instalaciones, compartimos conocimientos y fuimos tratados de un modo encantador. Quiero emplear estas líneas para agradecer toda la ayuda y apoyo que el personal de la Universidad de Valencia me ha brindado. A todos ellos, gracias.

Gracias compañeros de carrera y amigos. Gracias por hacer que mi paso por la Universidad haya sido algo memorable e inolvidable.

Gracias a mi familia, gracias por todo el apoyo y ayuda que me habéis brindado, gracias por esos gestos de orgullo que ahora se os dibujan...

Preámbulo

En los Planes de Estudio estructurados en créditos, el Proyecto Fin de Carrera es una asignatura obligatoria situada en el último cuatrimestre de la carrera. Por tanto, la realización y presentación del PFC es un requisito de obligatorio cumplimiento en las enseñanzas técnicas para superar el Plan de Estudios y poder obtener el título.

En la carrera de Ingeniería de Telecomunicación el PFC es un trabajo realizado individualmente por cada alumno, bajo la dirección de un profesor, que tiene como finalidad la aplicación por parte de aquel de los conocimientos y de las habilidades adquiridas y de sus dotes de análisis y síntesis, para dar solución a un trabajo técnico de corte igual o similar a los que pueda desarrollar en el ejercicio de su profesión como ingeniero.

El presente documento representa la memoria de mi PFC, consistente en la "*Instalación y puesta en marcha de un pequeño Radiotelescopio en la UPCT con el que observar la emisión de Hidrógeno atómico del Universo*". Esta memoria presenta una estructura sencilla: se encuentra dividida en capítulos, en cada uno de los cuales se tratan las diferentes labores llevadas a cabo durante la realización de mi PFC.

En el primer capítulo se exponen una serie de motivaciones y justificaciones del PFC, el porqué de incorporarme a un ambicioso proyecto que lleva desarrollándose en la ETSIT (*Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación*) de la UPCT desde el año 2004.

En el Capítulo 2 se realiza una introducción a la Radioastronomía, realizando breves reseñas históricas e introduciendo algunos conceptos básicos. Se analiza el presente y futuro de la Radioastronomía, describiendo brevemente los instrumentos y las técnicas que se emplean en esta rama de la Astronomía. Finalmente, se realiza una pequeña introducción al Radiotelescopio de la UPCT.

En el tercer capítulo se tratan las necesidades que se tiene para poner en marcha el radiotelescopio, los materiales y equipos requeridos, su búsqueda y compra, y la posterior comprobación de que cumplen con las especificaciones requeridas. El siguiente capítulo se dedica a todo lo que tuvo que ver con la instalación del radiotelescopio.

A parte de realizar labores de puesta en marcha del radiotelescopio se ha trabajado conjuntamente con compañeros de la UPCT en el diseño y fabricación de un receptor-entrenador de microondas sintonizado a 1420 MHz. El capítulo quinto trata sobre el diseño y fabricación de este receptor-entrenador.

En el último capítulo se exponen las conclusiones de este PFC y las líneas futuras. Al final del documento se muestra la bibliografía utilizada y se anexan algunos documentos citados.

Índice general

1. Motivaciones y justificación del proyecto	7
2. Introducción	9
2.1. Introducción a la Radioastronomía	10
2.1.1. Algunos conceptos	11
2.1.2. El presente y futuro de la Radioastronomía	13
2.2. Introducción al Radiotelescopio de la UPCT	17
3. Necesidades del Radiotelescopio de la UPCT	19
3.1. Necesidades de equipos	19
3.1.1. Antena receptora	20
3.1.2. Sistema de motores	27
3.1.3. Dispositivos de acondicionamiento de señal	29
3.1.4. Receptor comercial	33
3.2. Necesidades de ubicación	34
3.3. Búsqueda y compra de equipos	36
3.3.1. Búsqueda y compra de la antena receptora	36
3.3.2. Búsqueda y compra del sistema de motores	39
3.3.3. Búsqueda y compra del receptor comercial y dispositivos de acondi- cionamiento de señal	41
3.4. Testeo de equipos	45

4. Instalación del Radiotelescopio	51
4.1. Montaje de la antena receptora	51
4.1.1. Montaje de la estructura del reflector parabólico	52
4.1.2. Colocación de la superficie reflectora	54
4.1.3. Colocación de la bocina	57
5. Diseño y fabricación del receptor-entrenador	59
5.1. Introducción al receptor-entrenador	59
5.2. Dispositivos que forman el receptor-entrenador	61
5.2.1. Filtro paso-banda centrado a 1420 MHz	61
5.2.2. Amplificadores de bajo ruido	74
5.2.3. Oscilador	75
5.2.4. Mezclador	78
5.2.5. Filtro paso-banda centrado a 1420 MHz con cero de transmisión en 1296 MHz	81
5.3. Simulaciones del receptor-entrenador	82
5.3.1. Simulaciones de la cadena de RF	82
5.3.2. Simulaciones del espectro	84
5.4. Generación del layout y fabricación del receptor-entrenador	89
6. Conclusiones y líneas futuras	97

Índice de figuras

2.1. Imagen de la Galaxia NGC 1512. Cortesía de Hubble	9
2.2. Antena que Karl G. Jansky utilizó para observar la primera radiación de origen extraterrestre [1]	10
2.3. Patrón de emisión de radiación de un cuerpo negro	11
2.4. Mecanismo de emisión de la línea de HI	13
2.5. El radiotelescopio de 30 m del IRAM en Pico Veleta, cerca de Granada, a 2.800 m de altitud	15
2.6. Interferómetro en el Plateau de Bure. Cortesía de IRAM	15
2.7. Representación del satélite HALCA en órbita. Cortesía de JPL e ISAS	16
3.1. Esquema básico del Radiotelescopio de la UPCT	20
3.2. Importancia del poder de resolución de un instrumento astronómico	20
3.3. Antena parabólica de foco primario [10]	21
3.4. Diagrama polar y sus características	25
3.5. Onda polarizada linealmente (verticalmente)	26
3.6. Medida de intensidades de una radiofuente	27
3.7. Sistema de coordenadas altazimutal	28
3.8. Esquema detallado del Radiotelescopio de la UPCT	29
3.9. Localización del Radiotelescopio de la UPCT. Cortesía de Google Maps	34
3.10. Planta de la azotea del nuevo edificio I+D+I de la UPCT	35
3.11. Espectro electromagnético medido en la azotea del edificio I+D+I de la UPCT	35
3.12. Radiotelescopio de la Facultad de Física de la Universidad de Valencia	37

3.13. Reflector parabólico de 3 m de diámetro. Cortesía de RF HAMDESIGN . . .	38
3.14. Bocinas adquiridas en RF HAMDESIGN	39
3.15. Sistema de motores AZ/EL empleado en el Radiotelescopio de la UPCT . . .	40
3.16. Controlador del sistema de motores empleado en el Radiotelescopio de la UPCT	41
3.17. Receptor comercial empleado en el Radiotelescopio de la UPCT	43
3.18. LNA empleado en el Radiotelescopio de la UPCT	43
3.19. Sistema <i>cooler</i> de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT	44
3.20. Filtro paso-banda y perfil de HI característico. Cortesía de la UV	44
3.21. Fuente de ruido del Radiotelescopio de la UPCT	44
3.22. Testeo de las bocinas del Radiotelescopio de la UPCT	46
3.23. Parámetro S_{11} de las bocinas del Radiotelescopio de la UPCT	47
3.24. Medida de los parámetros S de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT . .	48
3.25. Parámetros S de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT	49
3.26. Proceso de medida con el medidor de ruido HP 8970B	50
4.1. Fijación de los brazos de la estructura del reflector parabólico	52
4.2. Aspecto de araña gigante de la estructura del reflector	53
4.3. Colocación de anillos concéntricos que unen los brazos de la estructura del reflector	54
4.4. Colocación de la superficie reflectora	55
4.5. Aspecto del reflector con la superficie reflectora colocada	56
4.6. Bocinas del Radiotelescopio de la UPCT	57
5.1. Esquema característico de un receptor superheterodino	60
5.2. Especificaciones de un filtro paso-banda	62
5.3. Longitudes eléctricas de las líneas acopladas [2]	63
5.4. Esquemático MWO del filtro con líneas acopladas	63
5.5. Respuesta del filtro de entrada con líneas acopladas	64

5.6. Longitudes eléctricas de las líneas acopladas y las curvas [2]	64
5.7. Transformación de las líneas acopladas de entrada y salida [2]	65
5.8. Características del sustrato empleado para la fabricación	65
5.9. Esquemático MWO del filtro Hairpin diseñado	65
5.10. Respuesta del filtro Hairpin empleando MWO	66
5.11. Layout del filtro Hairpin de entrada	66
5.12. Layout del filtro y mallado en ADS	68
5.13. Parámetros S del filtro empleando la herramienta <i>Momentum</i> de ADS	69
5.14. Comparación de los resultados obtenidos por MWO y ADS	69
5.15. Respuesta del filtro Hairpin empleando ADS	70
5.16. Importar el layout del filtro	72
5.17. Dibujar el layout de la capa inferior	72
5.18. Definir las zonas de metal que deben ser eliminadas	73
5.19. Respuesta del filtro fabricado	74
5.20. Parámetro S_{21} y layout en tecnología microstrip de un LNA del receptor-entrenador [?]	75
5.21. Espectros en un proceso de mezclado	76
5.22. Diagrama de bloques del oscilador del receptor-entrenador [2]	77
5.23. Espectro del oscilador tras generador de armónicos [2]	77
5.24. Esquemático y layout del oscilador del receptor-entrenador [2]	78
5.26. Híbrido branchline empleado como combinador [11]	79
5.27. Salida del mezclador para una simulación ideal [?]	80
5.28. Layout del mezclador del receptor-entrenador [?]	80
5.29. Layout y respuesta en frecuencia del filtro paso-banda sintonizado a 1420 MHz con cero de transmisión en 1296 MHz	81
5.30. Esquemático MWO con las diferentes alternativas para la cadena de RF	83
5.31. Resultados de las simulaciones de las distintas alternativas de cadena de RF	84

5.32. Esquemático empleado para realizar las medidas de espectro	85
5.33. Espectros a la entrada del receptor-entrenador y tras el filtro paso-banda (señales RF y OL senoidales puras)	86
5.34. Espectros tras el primer LNA y en el puerto RF del mezclador (señales RF y OL senoidales puras)	86
5.35. Espectro a la salida del mezclador (señales RF y OL senoidales puras)	87
5.36. Espectro a la entrada del receptor entrenador y tras el segundo LNA (filtro paso-banda con cero de transmisión en 1296 MHz incluido)	87
5.37. Esquemático empleado para la simulación a nivel de sistema del receptor-entrenador	88
5.38. Espectros tras el segundo LNA con oscilador ideal (izquierda) y con el oscilador real (derecha)	88
5.39. Espectros de salida con oscilador ideal (izquierda) y con el oscilador real (derecha)	89
5.40. Esquemático MWO del receptor entrenador y líneas de interconexión	90
5.25. Espectro de salida del oscilador del Radiotelescopio de la UPCT [2]	92
5.41. Layout MWO del receptor entrenador (Toplayer exclusivamente)	93
5.42. TopLayer del receptor-entrenador	94
5.43. BottomLayer del receptor-entrenador	95
5.44. Layout final del receptor-entrenador	96

Capítulo 1

Motivaciones y justificación del proyecto

La carrera de Ingeniería de Telecomunicación comprende un gran número de asignaturas en las que se estudian y analizan todas y cada una de las etapas que intervienen en un sistema de telecomunicación complejo. El estudio se lleva a cabo desde lo que sería el bajo nivel (la propagación de señales, la interpretación de los unos y los ceros, el procesado hardware de señal, etc) hasta un nivel superior en el que se estudian diferentes protocolos de comunicación, diferentes tecnologías, etc.

En el ámbito de las TIC existen multitud de tecnologías diferentes, tecnologías que aparecen y al poco tiempo quedan obsoletas o, en el mejor de los casos, sufren cambios a ritmos vertiginosos. De este modo, para el estudiante de Ingeniería de Telecomunicación no es posible centrarse en el estudio de una tecnología en particular, así que lo que se realiza es un estudio básico (pero que a su vez es complejo) de todo lo que concierne a un sistema de comunicaciones general. Al final de la carrera, el alumno ha obtenido los conocimientos necesarios para enfrentarse a cualquier tecnología que aparezca en el mercado.

Durante los años de carrera, en el alumno se van despertando preferencias e inquietudes sobre una parte en concreto de un sistema de telecomunicaciones. El PFC, aparte de ser una asignatura del segundo cuatrimestre del quinto curso de carrera, cuya superación es imprescindible para obtener el título de ingeniero, representa una oportunidad clave para desarrollar una labor que de alguna manera satisfaga las preferencias e inquietudes antes mencionadas. Por otro lado, es una oportunidad de trabajar durante una temporada en uno de los múltiples grupos de investigación que trabajan en el seno de la Universidad, de conocer las tecnologías en las que ellos son especialistas y, por qué no, es una posibilidad de que el alumno enfoque su carrera profesional.

En mi caso en particular, mis preferencias e inquietudes estaban enfocadas a todo lo que tenía que ver con la propagación de señales, con la ingeniería de antenas y microondas, con todo lo que había detrás de esa televisión que se mostraba transparente al espectador, con ese satélite situado a miles de kilómetros de aquí y que continuamente se encontraba recibiendo información desde tierra y reenviándola hacia otro lugar que podía estar tan lejos como fuera necesario. Me fascinaba pensar que podía comprender cómo funcionaban esas

antenas que todo el mundo tenía en casa y que empleaban a diario, pero que muy pocos comprendían su funcionamiento.

A principios de 2008 me dispuse a elegir mi PFC. Podía optar por realizar un proyecto sencillo que me acarrearía pocos calentamientos de cabeza y pudiera superar en poco tiempo, o bien, elegir un proyecto de mayor magnitud en el que pudiera aplicar los conocimientos adquiridos en asignaturas de ingeniería de antenas y microondas que tanto me habían gustado, a pesar de que ésto me supusiera emplear más tiempo. Sin dudar, me decanté por la segunda opción, al fin y al cabo, “palos con gusto no duelen”.

Un día fui al despacho de José Luis Gómez Tornero, a quien había tenido el placer de tener como profesor. Le informé de que estaba interesado en realizar alguna de sus propuestas de PFC. A él le pareció estupendo y me informó de las diferentes vías de investigación en las que, junto a su grupo de investigación, estaba trabajando en aquél momento, y de las diferentes ofertas de PFC que de éstas se desprendían.

Al poco tiempo, José Luis se puso en contacto conmigo para informarme de una nueva propuesta de PFC. Me comentó que llevaban algunos años trabajando en un ambicioso proyecto que, por aquel entonces se denominaba ARIAM (*Aula-taller de Radioastronomía e Ingeniería de Antenas y Microondas*). Este proyecto pretendía instalar un pequeño radiotelescopio en la UPCT y crear un aula-taller en la que divulgar una ciencia hasta ese momento desconocida para mí, incluso desconocida por asociaciones astronómicas amateur. Además, varios alumnos de la UPCT ya habían basado sus PFC en el desarrollo de dispositivos que tendrían aplicación en este proyecto.

Este proyecto ya se encontraba en avanzado estado, se había conseguido financiación y se había desarrollado parte de la tecnología a emplear, pero aparecían nuevas necesidades de puesta en marcha y de sacar a relucir todo el trabajo que se estaba llevando a cabo desde años atrás. En este contexto, surgieron nuevas ofertas de PFC y a mí se me asignaron labores de puesta en marcha del radiotelescopio, la búsqueda y compra de los equipos necesarios, la búsqueda de un emplazamiento físico para el radiotelescopio, la instalación del mismo y la colaboración en el diseño y fabricación de un receptor-entrenador de microondas que se emplearía para recibir señales de origen extraterrestre.

Al realizar este proyecto, por un lado, se veían cubiertas aquellas inquietudes de las que hemos hablado, pues este PFC tenía mucha parte técnica en la que aplicar y extender mis conocimientos en ingeniería de antenas y microondas. Por otro lado, con este PFC tendría que realizar labores de gestión de proyectos, integración de sistemas, búsqueda y compra de materiales, estudio de tecnologías comerciales, preparación de informes técnicos, etc, de modo que podría desarrollar una serie de aptitudes y capacidades muy valoradas en el mundo laboral que me aguardaba.

Por éstas y otras razones acepté estas labores y me puse a trabajar en el proyecto.

Capítulo 2

Introducción

La mayor parte de la información de los astros se obtiene a través del estudio de la radiación que éstos emiten a lo ancho de todo el espectro electromagnético. Éste se divide convencionalmente en: rayos gamma, rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarrojo (IR), microondas y ondas de radio.

La atmósfera terrestre sólo es transparente a una pequeña parte del espectro: la luz visible, las microondas y las ondas de radio. Por ésto, fueron las primeras técnicas astronómicas en desarrollarse.

La Astronomía en el rango visible es la más madura de estas técnicas y a la que más acostumbrados estamos. No obstante, el constante avance tecnológico y el desarrollo de nuevas técnicas hace posible que ahora se pueda disfrutar de imágenes tan bellas como la mostrada de la Figura 2.1, obtenida al combinar la información resultante de observar una galaxia en diferentes rangos de frecuencias.



Figura 2.1: Imagen de la Galaxia NGC 1512. Cortesía de Hubble

Según el rango del espectro que se quiera observar se requiere de unos sistemas u otros: para observar en el visible se emplean telescopios ópticos formados por lentes y espejos, para observar en IR se emplean espejos pulidos al oro y sensores de infrarrojos y para observar en radio se emplean radiotelescopios.

Este PFC trata sobre el diseño, instalación y puesta en marcha de un radiotelescopio para observar la radiación electromagnética del Hidrogeno atómico, tan abundante en el Universo. Como se verá más adelante, un radiotelescopio consta de: una antena receptora, un receptor de ondas de radio o microondas, un sistema de motores que permita la orientación de la antena y un ordenador con el que procesar y visualizar los datos.

2.1. Introducción a la Radioastronomía

Como ocurre a veces en el mundo de la ciencia, las ondas de radio de origen extraterrestre se descubrieron en realidad mientras se investigaba otra cosa. En 1931, a Karl G. Jansky, un ingeniero de radio de los laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey (Estados Unidos), se le asignó la tarea de estudiar las interferencias en las ondas de radio producidas por los relámpagos de las tormentas, con el fin de ayudar a construir una antena robusta a dichas interferencias. Para ello, construyó un artefacto extraño, más parecido a un tiovivo de madera que a una antena moderna o a un radiotelescopio, que estaba sintonizado para detectar radiación de longitud de onda de 14.6 m. La antena estaba conectada a un receptor y su señal era registrada en una cinta continua.

Tras estudiar los resultados de su observación, Jansky identificó una emisión procedente del plano de nuestra galaxia, convirtiéndose en la primera observación radioastronómica. En 1937, otro ingeniero, Grote Reber, construyó la primera antena parabólica y realizó el primer mapa de emisión radio de la Galaxia.

La Radioastronomía posee una gran capacidad para investigar tanto astros a gran distancia, como otros más cercanos, a menudo revelándonos aspectos del Universo que no son observables en otras longitudes de onda. Debido a que el tiempo que la luz tarda en viajar desde un astro hasta nosotros puede ser muy grande, los objetos más alejados se nos muestran tal como eran hace mucho tiempo. Así, la Radioastronomía nos permite observar desde el estado primitivo del Universo, hasta el nacimiento y muerte de las estrellas más cercanas, pasando por galaxias más o menos lejanas y los planetas y cometas de nuestro sistema solar.

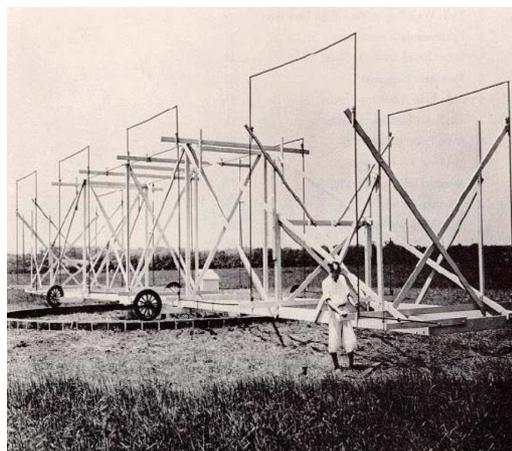


Figura 2.2: Antena que Karl G. Jansky utilizó para observar la primera radiación de origen extraterrestre [1]

2.1.1. Algunos conceptos

Sin que le aleje de las pretensiones de este PFC, resulta de interés introducir una serie de conceptos básicos de Radioastronomía.

Existen diferentes mecanismos de emisión electromagnética. Podemos separar estos mecanismos de emisión entre aquellos que producen una emisión en el *continuo*¹ y los que producen emisión de *líneas*². Dentro de estos dos tipos, se puede hacer una diferenciación entre los que son producidos por efectos de la temperatura (mecanismos *térmicos*) y aquellos en los que la temperatura no desempeña un papel fundamental (mecanismos *no térmicos*).

Uno de los mecanismos térmicos más importante es el conocido como radiación del *cuerpo negro*. Un cuerpo negro ideal absorbe toda la energía electromagnética que recibe (por eso se dice que es negro) y, por estar en equilibrio térmico, reemite toda la energía absorbida. Esta emisión depende exclusivamente de la temperatura del cuerpo y viene descrita por la *ley de radiación de Plank*, que dota de forma matemática a las gráficas mostradas en el Figura 2.3.

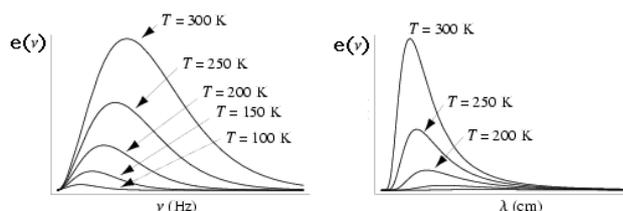


Figura 2.3: Patrón de emisión de radiación de un cuerpo negro

Existen otras dos leyes relacionadas con ésta que describen algunas características de interés: La *ley de desplazamiento de Wien* constata que el máximo de emisión se desplaza hacia longitudes de onda menores (frecuencias mayores) cuando la temperatura del cuerpo negro aumenta; la *ley de Steffan-Boltzmann* relaciona el flujo total de energía de cuerpo negro con su temperatura, de forma que el flujo total emitido es proporcional a la temperatura elevada a la cuarta potencia, por lo que a mayor temperatura será mayor la cantidad de energía emitida por un objeto.

El interior de una estrella se comporta, a efectos de radiación, como si fuera un cuerpo negro. Por este motivo, siguiendo la ley de Wien, estrellas con mayor temperatura tendrán máximos de emisión más energéticos (mayores frecuencias) y estrellas más frías tendrán su máximo en regiones menos energéticas (menores frecuencias) del espectro. Por tanto, si el máximo de la radiación depende únicamente de la temperatura del cuerpo, tendremos que los objetos celestes, dependiendo de su temperatura, emitirán fundamentalmente en unas regiones u otras del espectro electromagnético.

Se define la *densidad de flujo* de la radiación como la energía recibida por unidad de área, frecuencia y tiempo. En unidades del SI se mide en $\frac{W}{m^2 Hz}$. Los astrónomos, sin embargo,

¹Se llama emisión continua a aquella que varía suavemente en función de la frecuencia. Esta emisión está presente por tanto, en un amplio rango de frecuencias.

²La emisión se produce en una determinada y estrecha banda de frecuencias.

emplean más frecuentemente el concepto de *brillo*³. Puesto que la densidad de flujo recibida en la Tierra es muy pequeña, incluso para las fuentes más brillantes, se define el Jansky (*Jy*) como unidad para medir la densidad de flujo, cumpliéndose:

$$1Jy = 10^{-26} \frac{W}{m^2Hz}$$

La radioemisión cósmica, por lo que sabemos, proviene de procesos naturales, aunque de vez en cuando también se utilizan los radiotelescopios para buscar (hasta ahora sin éxito) posibles fuentes de radioemisión de inteligencia extraterrestre. A causa de los movimientos aleatorios de los electrones, todos los cuerpos emiten radiaciones *térmicas*, o calor, características de su temperatura. Se han utilizado mediciones cuidadosas, en todo el espectro, de la intensidad de emisiones para calcular la temperatura de los cuerpos celestes lejanos, así como de los planetas del Sistema Solar y las nubes cálidas de gas ionizado de toda nuestra galaxia. Sin embargo, las mediciones de la Radioastronomía se ocupan con frecuencia de las emisiones *no térmicas* mucho más intensas originadas por partículas cargadas, como los electrones y los positrones que se mueven a través de los campos magnéticos galácticos e intergalácticos. Cuando la energía de la partícula es tan alta que su velocidad se acerca a la velocidad de la luz, a la radioemisión de estas partículas “ultrarrelativistas” se hace referencia como *radiación de sincrotrón*, término tomado del laboratorio de física de gran potencia, donde fue descubierta por primera vez este tipo de radiación.

Tanto las radiofuentes de sincrotrón (no térmicas) como las térmicas, irradian en una amplia gama de longitudes de onda. Por el contrario, una tercera categoría de materia (átomos excitados, iones y moléculas) irradia en longitudes de onda discretas características del átomo o de la molécula y del estado de excitación. La radioemisión de amplia gama recibe el nombre de *emisión continua*.

Por otro lado, resulta interesante conocer los mecanismos de emisión de líneas espectrales, en concreto, el mecanismo de emisión de la línea de Hidrogeno neutro de 21 cm (en adelante, HI). El hidrógeno es el elemento más abundante del Universo y gracias a la observación de esta radiación se pudo determinar, entre otras cosas, la estructura espiral de nuestra galaxia, así como el movimiento de rotación de la misma alrededor de su centro. Las observaciones del HI han permitido también la determinación de la morfología y movimiento de rotación de otras galaxias.

El mecanismo de formación de esta línea, de forma simplificada, es el siguiente: En el caso de los átomos neutros de hidrógeno, es decir, átomos no ionizados, el nivel más bajo de energía viene dado por la situación en que los espines del electrón y del protón son antiparalelos, es decir, tienen sentidos opuestos. Si el átomo de hidrógeno neutro adquiere una cantidad pequeña de energía (por ejemplo, por colisión), los espines del electrón y del protón pueden alinearse de forma que el átomo quede en un estado excitado. Si el átomo retorna entonces al nivel fundamental de menor energía lo hace emitiendo un fotón de frecuencia 1420,406 MHz.

Se necesita poca cantidad de energía para que un átomo de hidrógeno se excite para emitir la línea de 21 cm. Ésto supone que esta línea se encontrará en nubes de gases fríos

³Se define como la energía recibida por unidad de área en una frecuencia determinada procedente del ángulo sólido subtendido por la fuente y teniendo en cuenta el ángulo de incidencia.

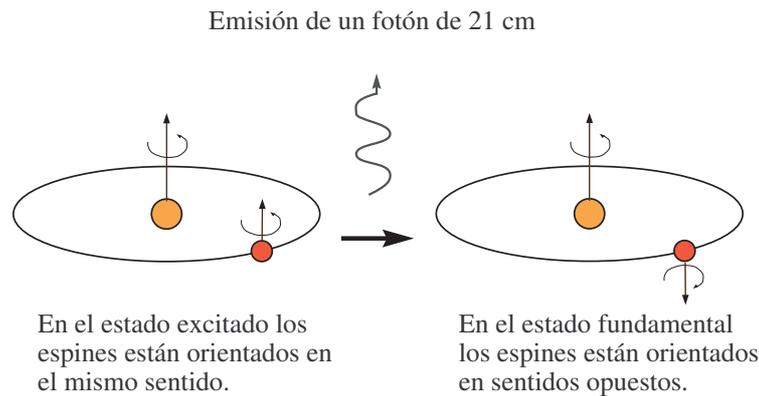


Figura 2.4: Mecanismo de emisión de la línea de HI

no muy energéticos. El estudio de la línea de HI es de vital importancia, pues allá donde se acumulan grandes cantidades de HI se da lugar a la formación de nuevas estrellas, planetas y galaxias. El Radiotelescopio de la UPCT pretende observar la línea de HI de un modo amateur.

2.1.2. El presente y futuro de la Radioastronomía

La Radioastronomía resulta un técnica de gran interes para conocer el cosmos. Según astrofísicos, nos encontramos ante lo que llaman un “Universo frio” que, cada vez emite menos cantidad de radiación óptica y no queda más remedio que seguir estudiandolo en otras frecuencias.

La Astrofísica contemporánea se enfrenta con varios problemas fundamentales en la comprensión del cosmos. Por ejemplo, la formación de los planetas, de las estrellas, de las galaxias y, naturalmente, del Universo como un todo, permanecerán entre los objetivos prioritarios durante al menos una buena porción del siglo XXI.

Las observaciones han revelado que los procesos físicos que dominan la formación de planetas, estrellas y galaxias, así como la evolución temprana de todos estos objetos, suceden en un medio material a muy baja temperatura (típicamente entre 10 y 100 K). Este “Universo frio” apenas emite radiación óptica, ni de frecuencias más altas (ultravioletas, rayos X, etc), pero sí que emite radiaciones en ondas de radio, preferentemente en los rangos milimétrico y submilimétrico (mm/submm) del espectro.

Las estrellas, enormes factorías de elementos pesados, también forman pequeñas partículas sólidas: los granos de polvo. El polvo pasa a formar parte del medio interestelar al final de la vida de las estrellas y allí, mezclado con gas molecular, actua como una pantalla que nos impide ver las nuevas estrellas y los planetas que se forman en el seno de esas nubes. De la radiación emitida por los objetos oscurecidos (ya sean protoestrellas, protoplanetas o núcleos de galaxias externas) tan sólo las ondas infrarrojas y de radio son capaces de escapar de la nube que los envuelve.

Por otro lado, la emisión del polvo interestelar tiene lugar en el dominio mm/submm y lo mismo sucede con las moléculas que constituyen el gas de las nubes interestelares. El estudio de estas radiaciones proporciona el único medio de diagnóstico fiable sobre las condiciones físicas (densidad y temperatura) y la composición química del ámbito en que se forman las estrellas. Este mismo tipo de medidas es lo que permite estudiar las nubes de gas y polvo que envuelven los núcleos de las galaxias lejanas.

El continuo mm/submm es una radiación similar a la de un cuerpo negro que tiene su máximo de emisión entre $100 \mu\text{m}$ y 1 mm y que se origina en el polvo interestelar. Estos fotones forman una radiación relativamente tenue y difusa, pero acaba contribuyendo con una gran densidad de energía tanto al fondo de la Vía Láctea como al del fondo extragaláctico. De hecho, los fotones submilimétricos son los más abundantes del Universo.

Las líneas espectrales que se observan en radio se forman tanto en las regiones HII a causa de los fenómenos de recombinación como en el gas molecular de las nubes interestelares y circunestelares. Las transiciones entre los niveles rotacionales más bajos de un gran número de moléculas tienen lugar en el dominio mm/submm, rango en el que hay más de 1000 líneas espectrales conocidas. Este alto número de líneas espectrales, junto con las razones mencionadas antes, hacen del rango mm/submm el más apropiado para el estudio de las nubes interestelares, de sus objetos embebidos y, en resumen, de todo el “Universo frío”.

Resulta por tanto que la Radioastronomía tiene para el astrónomo actual un interés estratégico clave, ésta es la banda que permite abordar muchos de los problemas que absorben los esfuerzos de gran número de nuestros investigadores.

Radiotelescopios e interferómetros

Los astrónomos no han descuidado el rango de ondas de radio, pero tecnológicamente las observaciones en este rango de longitudes de onda no son tarea fácil. Los radiotelescopios de antena parabólica han de tener una gran precisión en su superficie, y por lo tanto tienen serias limitaciones en su tamaño.

Estos radiotelescopios de antena única tienen diámetros típicos entre 10 y 40 metros, lo que equivale a un poder de resolución angular entre $30''$ y $8''$ a 1 mm de longitud de onda, mucho menor de lo que consiguen los telescopios ópticos convencionales. Con este poder de resolución, el astrónomo no puede distinguir los detalles que desearía: por ejemplo, ver un disco gaseoso que puede estar formando planetas en torno a una estrella cercana.

En las nubes moleculares más cercanas, $8''$ de resolución equivalen a más de 1000 UA^4 y no es posible por tanto el distinguir detalles del tamaño de nuestro Sistema Solar. La misma situación se da en la Astrofísica extragaláctica, pues aunque con los instrumentos actuales puede detectarse la radiación emitida por muchas galaxias, no es posible tener una idea mínimamente detallada de sus regiones de formación estelar, o de la estructura de sus regiones nucleares.

Con el fin de superar las dificultades técnicas inherentes a la construcción de grandes an-

⁴ $1 \text{ UA} \approx 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$



Figura 2.5: El radiotelescopio de 30 m del IRAM en Pico Veleta, cerca de Granada, a 2.800 m de altitud

tenas de precisión, se construyen interferómetros. *El poder de resolución de un interferómetro es el equivalente al de una antena única tan grande como la máxima distancia que separa a las antenas individuales.*

Por ejemplo, el interferómetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) en el Plateau de Bure (Alpes franceses) está formado por 6 antenas móviles de 15 m de diámetro. Situando las antenas en diferentes posiciones, que pueden distar hasta unos 500 metros entre sí se obtiene un poder de resolución en torno a $1''$ (para 1 mm de longitud de onda), lo que significa 140 UA en las nubes de Taurus. Sin embargo, para obtener una buena observación con un interferómetro de un número reducido de antenas es conveniente mover las antenas a posiciones diferentes para intentar obtener un muestreo tan completo como sea posible de las ondas incidentes. Esto supone situar las antenas en una configuración, realizar una observación del objeto que nos interesa, mover a otra configuración y rehacer la observación, y así tantas veces como sea preciso. Combinando estas observaciones se llega a obtener una imagen fiel del objeto que estamos estudiando.



Figura 2.6: Interferómetro en el Plateau de Bure. Cortesía de IRAM

De lo expuesto se pueden deducir rápidamente cuáles son las limitaciones de un interferómetro. Por un lado se trata de un sistema lento de observación y, por otro, está limitado a

fuentes relativamente brillantes, aquellas que sean detectables gracias al área colectora total de las antenas individuales. Para paliar estas limitaciones hay que:

1. Aumentar el número de antenas tanto como sea posible para mejorar el muestreo, y hacer así que las observaciones sean más rápidas.
2. Construir antenas tan grandes como sea posible para aumentar el área colectora y, por tanto, la sensibilidad.

Para que el lector se haga una idea de la poca energía que colectan los radiotelescopios, me atrevería a decir que la energía recibida por todos los radiotelescopios del mundo apenas sería suficiente para hacer funcionar uno de los teléfonos móviles que llevamos en nuestros bolsillos. Ésto hace que los receptores empleados en aplicaciones de Radioastronomía requieran de una elevada sensibilidad y sean capaz de amplificar miles de veces la debil señal que reciben introduciendo el mínimo ruido posible.

Ya hemos mencionado que con la interferometría se consiguen resoluciones angulares equivalentes a las que conseguiría una antena cuyo diámetro fuese el mismo que la mayor distancia entre antenas del interferómetro. Por lo tanto, realizando interferometría con los radiotelescopios con los que hoy contamos (sobre la superficie de la Tierra), la mayor línea de base que podemos conseguir será igual al diámetro de la Tierra.

Si queremos obtener líneas de base mayores, para mejorar la resolución angular, debemos utilizar radiotelescopios situados en el espacio.

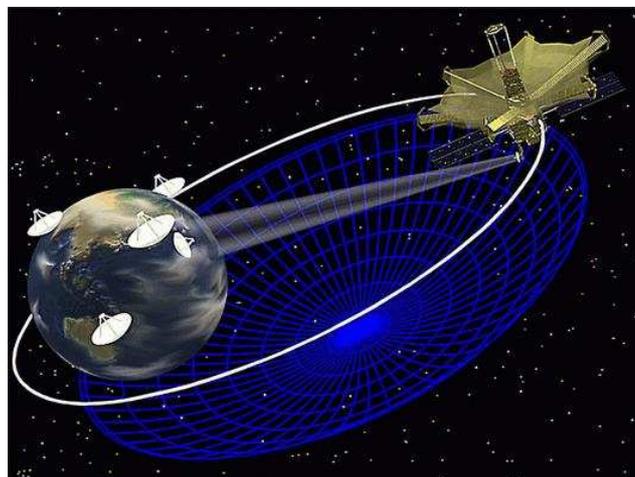


Figura 2.7: Representación del satélite HALCA en órbita. Cortesía de JPL e ISAS

El primer proyecto de interferometría espacial VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*) ya se llevó a cabo con éxito entre los años 1997 y 2002. Consistió en la puesta en órbita del satélite japonés HALCA, (ver Figura 2.7), con un radiotelescopio de 8 m que contaba con receptores de entre 1.3 y 18 cm de longitud de onda. Realizando observaciones coordinadas con radiotelescopios terrestres, se consiguieron resoluciones angulares de hasta 50 microsegundos. Si nuestros ojos tuvieran esa resolución, podríamos ver desde Madrid una moneda de un céntimo que estuviera en Barcelona y distinguir perfectamente todos los detalles del dibujo de la Catedral de Santiago que aparece en la moneda.

2.2. Introducción al Radiotelescopio de la UPCT

El lector se puede hacer una idea de la complejidad de los instrumentos radioastronómicos, de las dificultades que científicos e ingenieros encuentran para poner en marcha grandes radiotelescopios e interferómetros profesionales. Se trata de proyectos de gran magnitud, en los que en ocasiones se encuentran implicados varios países colaboradores. Son fuentes de conocimiento científico y de nuevas tecnologías que, a menudo revelan nuevos misterios del Universo. Lo que aquí se trata poco tiene que ver con lo anterior. El Radiotelescopio de la UPCT será un pequeño radiotelescopio amateur con el que observar la emisión de HI a 1420 MHz, cuya principal finalidad no es aportar nada nuevo al conocimiento astronómico (quizás algún día). Sin embargo, se trata de un proyecto ambicioso que persigue distintos fines.

Por un lado, la Radioastronomía, aunque fascinante, representa una de las ramas de la Astronomía más desconocidas por el público en general, quizás este desconocimiento se deba en parte a la complejidad de los instrumentos radioastronómicos, basados en tecnología de antenas y receptores de microondas o radiofrecuencia de gran sensibilidad. En la ETSIT de la UPCT, aunque en general no se dispone de grandes conocimientos en astrofísica, si se dispone de un gran conocimiento en ingeniería de antenas y microondas y de medios suficientes para desarrollar tecnología. Aprovechando este fuerte, en el 2004 algunos profesores y alumnos de la UPCT comenzaron a desarrollar la tecnología y el conocimiento necesario para poner en marcha un pequeño radiotelescopio en la UPCT.

Además, se cuenta con la colaboración de la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia (UV), la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), y con el Instituto de Física perteneciente a la Universidad de Cantabria (UC) y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Durante estos últimos años, distintos profesores de la ETSIT han dirigido PFCs en los que se desarrollaba en tecnología impresa y guía de onda la gran mayoría de los dispositivos que forman un receptor de microondas: amplificadores de bajo ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*), filtros, mezcladores, osciladores, alimentadores, etc. Con estos dispositivos se pretende desarrollar un receptor-entrenador de microondas en tecnología microstrip de elevada sensibilidad y baja figura de ruido. Lo hemos llamado receptor-entrenador por que no solo será utilizado como simple receptor, sino que será diseñado con un aspecto y características que le permitan ser usado como herramienta docente, con la que alumnos y resto de público puedan observar y comprender el procesado hardware que sufre la señal de microondas desde que es recibida del espacio por la antena hasta que es digitalizada y visualizada en un ordenador.

Adjunto al radiotelescopio se pretende crear un aula-taller en la que poder recibir visitas y en la que realizar tareas de divulgación científica, tanto a nivel de radioastronomía como de ingeniería de antenas y microondas. En definitiva, lo que aquí se pretende es hacer llegar al público de a pie esta apasionante rama de la Astronomía y la tecnología que lleva asociada, y cómo con trabajo, coordinación y esfuerzo se logra diseñar y poner en marcha un sistema tan complejo y avanzado como lo es un radiotelescopio.

Actualmente, el Radiotelescopio de la UPCT, se encuentra en su fase de instalación y puesta en marcha. En este PFC se trata todo lo que tiene que ver con esta fase del proyecto,

en el Capítulo 3, el más extenso, se estudian las necesidades que se tienen para poner en marcha el radiotelescopio. Por supuesto, el proyecto del Radiotelescopio de la UPCT no finaliza aquí, si no que, cómo hasta ahora, seguirá desarrollándose, incluyendo nuevas mejoras y atendiendo a las inquietudes de profesores, alumnos y resto de usuarios. Por ejemplo, en un futuro próximo se pretende instalar una nueva antena receptora con el fin de poder llevar a cabo prácticas de interferometría.

Para óbtener más información sobre el Radiotelescopio de la UPCT el lector puede visitar el apartado Radiotelescopio de la web www.upct.es/geat.

Capítulo 3

Necesidades del Radiotelescopio de la UPCT

En este capítulo se estudian y se da solución a las distintas necesidades que se tienen para poner en marcha el Radiotelescopio de la UPCT. Se puede hacer una diferenciación entre lo que sería *necesidades de equipos* y *necesidades de ubicación* para el radiotelescopio.

En cuanto a las necesidades de equipos se requiere, por un lado, elegir el modelo de antena a emplear, sus características físicas y de radiación. Por otro lado, es necesario elegir un sistema de motores que permita apuntar con la antena a las distintas fuentes. También se requiere de un receptor de microondas comercial con el que realizar el procesado hardware de la señal recibida por la antena, así como una serie de dispositivos que permitan el correcto acondicionamiento de la señal: filtros, amplificadores de bajo ruido, cableado, etc.

En lo que a las necesidades de ubicación se refiere, es necesario encontrar una ubicación física para emplazar la antena del radiotelescopio y el resto de equipos. Como se verá, se han de tener en cuenta una serie de consideraciones, como sería el disponer de un cielo despejado, libre de interferencias electromagnéticas, un fácil acceso, etc.

Parte de la tecnología a emplear en el Radiotelescopio de la UPCT será diseñada y fabricada por alumnos y profesores de la ETSIT, ésto es algo que lo diferencia de otros radiotelescopios amateur. Aún así, fue necesario recurrir a empresas externas a la UPCT para adquirir aquellos equipos que, por falta de medios, no pudimos fabricar. En este capítulo se incluye una sección en la que se trata todo lo que tuvo que ver con la búsqueda y compra de equipos en empresas externas a la UPCT.

3.1. Necesidades de equipos

En esta sección se estudian las necesidades de equipos y se plantean las características que éstos han de tener para emplearse en el radiotelescopio. Para hacernos una idea de los equipos necesarios, la Figura 3.1 muestra un esquema básico de lo que será el Radiotelescopio de la UPCT.

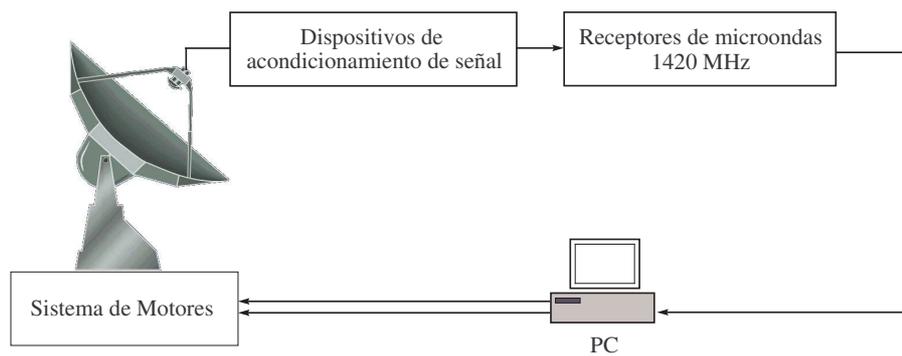


Figura 3.1: Esquema básico del Radiotelescopio de la UPCT

3.1.1. Antena receptora

Existen múltiples tipos de antenas. Dependiendo del tipo de aplicación, de la frecuencia de trabajo, se pueden emplear: antenas grandes, antenas más pequeñas, antenas más o menos directivas, antenas capaces de transmitir y recibir mayor o menor potencia, antenas que transmitan y reciban con una determinada polarización, etc.

La principal finalidad de la antena de un radiotelescopio es captar la máxima radiación de la fuente observada a la frecuencia a la que el radiotelescopio se encuentra sintonizado. No menos importante, es disponer de un radiotelescopio con un *gran poder de resolución*, que permita estudiar la fuente observada como algo extenso y no como algo puntual.

Como símil (ver Figura 3.2), imaginemos que queremos estudiar la superficie A y para ello empleamos dos sondas distintas, S1 y S2. Puesto que S2 es menos fina (menos directiva) que S1, la información que podremos obtener al estudiar la superficie A empleando la sonda S1 será más completa y detallada que la que obtendríamos al emplear S2. Lo anterior es debido a que S1 presenta mayor poder de resolución que S2. Algo similar ocurre en Astronomía, de hecho, el aumentar el poder de resolución de los instrumentos astronómicos representa una de las principales vías de investigación en este campo. De modo que el estudio astronómico pueda llegar más lejos y con mayor detalle.

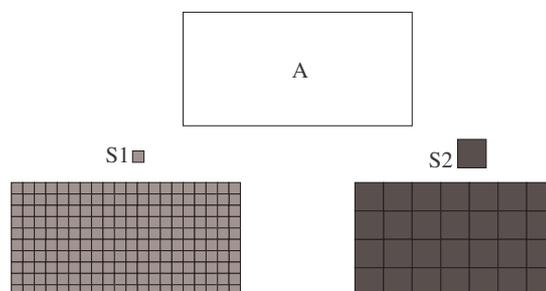


Figura 3.2: Importancia del poder de resolución de un instrumento astronómico

La mayoría de los radiotelescopios emplean grandes antenas parabólicas como antenas receptoras. Este tipo de antena presenta las dos características de interés antes descritas: capacidad para captar gran cantidad de energía electromagnética, lo que supone *gran sensi-*

bilidad y directividad, lo que supone *gran resolución angular*.

Aunque existen diversos tipos de antenas parabólicas, aquí se estudia el más común de todos ellos, la *antena parabólica de foco primario*. Este tipo de antena está formada por un paraboloides de revolución que actúa como *reflector* y un *iluminador* o *bocina*. Debido a las propiedades geométricas de la parábola, el frente de ondas planas que incide paralelo al eje de ésta es reflejado en el reflector y dirigido hacia el foco de la parábola. El que una antena parabólica tenga gran directividad se debe precisamente al hecho de que solo las ondas que inciden paralelas al eje de la parábola son concentradas en el foco. En este punto se concentra gran cantidad de energía electromagnética y es donde se coloca el iluminador o bocina, encargado de transformar las ondas recibidas del espacio en ondas guiadas que, tras ser filtradas y amplificadas serán introducidas en el receptor.

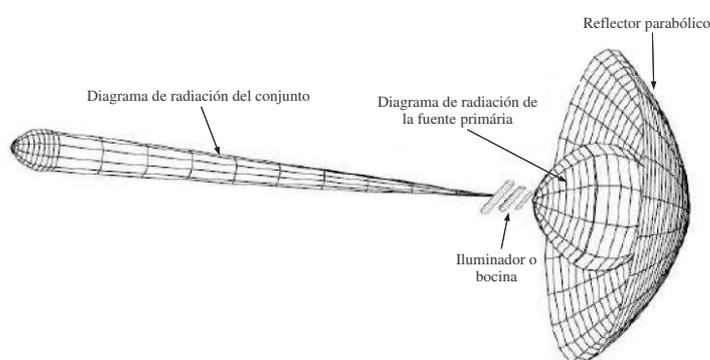


Figura 3.3: Antena parabólica de foco primario [10]

En la Figura 3.3 podemos observar el sistema formado por el reflector parabólico y el iluminador o bocina, también conocido como fuente primaria. La bocina crea un diagrama de radiación poco directivo (diagrama de radiación de la fuente primaria), el cual debe ser capaz de iluminar en su totalidad la superficie del paraboloides. También podemos observar el diagrama de radiación del conjunto, mucho más directivo que el diagrama de radiación de la fuente primaria.

El reflector parabólico viene caracterizado, por un lado, por el diámetro del reflector (D). Como se verá, cuanto mayor sea el valor de este parámetro mayor será el área a iluminar por la fuente primaria, pudiendo lograrse elevadas ganancias. Por otro lado, tenemos el valor de la distancia focal (f), que representa la distancia que hay entre el centro de la parábola y el foco.

Con los parámetros D y f obtenemos un nuevo parámetro que es muy importante y descriptivo cuando se habla de reflectores parabólicos. Se trata de la relación f/D que nos ofrece una idea de la profundidad y la forma que posee el reflector.

A continuación, se introducen algunos conceptos básicos sobre antenas y se particularizan éstos para el caso de antenas parabólicas de foco primario.

NOTA: En virtud del *teorema de reciprocidad* todos los parámetros que aquí se exponen son válidos tanto en transmisión como en recepción. Ésto es sumamente útil a la hora de medir los parámetros de una antena, ya que basta con medir como funciona una antena radiando para saber cómo capta la radiación electromagnética.

Área efectiva

Dado que la potencia recibida por una antena (W_{rec}) es captada a partir de la densidad de potencia correspondiente al frente de onda que incide sobre ella (P_{inc}), podemos asociar a la antena una determinada superficie equivalente o área efectiva (A_{ef}) definida como la relación entre la potencia recibida por la antena y la densidad de potencia que incide sobre ella. Asumiendo que se trata de una antena sin pérdidas y en la que se dan las condiciones de adaptación a carga, se tiene:

$$A_{ef} = \frac{W_{rec}}{P_{inc}} \quad (3.1)$$

La potencia recibida en bornes de una antena se puede calcular a partir de la densidad de potencia radiada o brillo de la fuente observada (S), el A_{ef} de la antena y el ancho de banda observado (B) a partir de la expresión:

$$W_{rec} = SA_{ef}B \quad (3.2)$$

Generalmente, el brillo de un radiofuente viene expresado en Jy y se ha de traducir a unidades del SI ($\frac{W}{m^2Hz}$) como se vio en el Capítulo 2.

De este modo, cuanto mayor sea el A_{ef} de la antena de un radiotelescopio, mayor será la *sensibilidad* del mismo. En definitiva, en aplicaciones de Radioastronomía, interesa trabajar con antenas de gran envergadura, capaces de captar la mayor cantidad posible de energía electromagnética.

Para una antena parabólica de foco primario el A_{ef} es siempre menor que el área geométrica del reflector (A_{geo}), de modo que existe un término de eficiencia ($\eta_{ilu} < 1$) que relaciona dichas áreas:

$$A_{ef} = \eta_{ilu}A_{geo} \quad (3.3)$$

Longitud efectiva

De forma análoga al área efectiva, aparece el concepto de longitud efectiva (L_{ef}) que se define como la relación entre la tensión inducida en una antena en circuito abierto (V_a) y el campo eléctrico incidente en la misma (E_{inc}).

$$L_{ef} = \frac{V_a}{E_{inc}} \quad (3.4)$$

Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una determinada dirección del espacio ($P(\theta, \varphi)$) y la densidad de potencia radiada por una antena isótropa¹ con la misma potencia total radiada (W_{rad}) a la misma distancia.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{W_{rad}}{4\pi r^2}} \quad (3.5)$$

Ganancia

La ganancia cuantifica la relación entre la densidad de potencia radiada por una antena en una determinada dirección del espacio ($P(\theta, \varphi)$) y la densidad de potencia radiada por una antena isótropa si toda la potencia entregada a ésta fuera radiada.

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{W_{ent}}{4\pi r^2}} \quad (3.6)$$

La diferencia entre W_{ent} y W_{rad} es la potencia disipada por la antena debida a pérdidas. Así, existe una eficiencia de la antena (η) que se puede calcular como $\eta = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}$, de modo que se satisface:

$$W_{rad} = \eta W_{ent} \quad (3.7)$$

$$G(\theta, \varphi) = \eta D(\theta, \varphi) \quad (3.8)$$

En la práctica, la ganancia es el parámetro más usado para describir las características de una antena. Tanto la ganancia como la directividad pueden ser referidas a cualquier antena estándar, la antena isótropa o el dipolo en $\lambda/2$. En tales casos, la ganancia vendrá expresada en dBi o en dBd respectivamente.

La máxima ganancia que se puede obtener con un reflector parabólico de foco primario se puede calcular aproximadamente mediante la expresión.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ilu} \quad (3.9)$$

Donde la superficie iluminada A_{ilu} , para el caso de emplear como iluminador una bocina cilíndrica se tiene el área de un círculo.

¹Se trata de una antena que transmite y recibe la misma cantidad de potencia en todas las direcciones del espacio. En la práctica son irrealizables pero frecuentemente se emplean como herramienta para el análisis de otro tipo de antenas más complejas.

$$A_{ilu} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (3.10)$$

De modo que la expresión de la ganancia queda de la siguiente manera:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (3.11)$$

La anterior ecuación solo es válida para el caso de emplear un reflector perfectamente construido e iluminado, para un caso más general se debe incluir un término de eficiencia. No obstante, de la ecuación anterior se desprende que una antena parabólica de foco primario presentará una mayor ganancia (y por tanto una mayor directividad) cuanto mayor sea su diámetro D y menor sea la longitud de onda de trabajo λ (mayor frecuencia de trabajo).

En nuestro caso, la longitud de onda de trabajo es la correspondiente a la emisión de HI (21.1 cm), de modo que si queremos que la baja densidad de potencia radiada por las radiofuentes se traduzca en una señal de suficiente potencia como para poder ser interpretada en el receptor se deben emplear reflectores de gran diámetro.

Ancho de banda

Es necesario destacar que toda antena tiene un desempeño correcto dentro de un rango de frecuencias específico al que se llama ancho de banda.

Para una antena parabólica de foco primario su ancho de banda viene limitado, normalmente, por el ancho de banda del iluminador y bocina empleado. Más adelante, el lector podrá comprobar que el ancho de banda de la antena del Radiotelescopio de la UPCT vendrá caracterizado por el parámetro S_{11} de las bocinas empleadas. Aún así, en ocasiones también el reflector limita el rango de frecuencias en las que la antena tiene un buen desempeño.

Se diseñan reflectores con diámetros mayores a 10λ que es un límite inferior práctico. El máximo alejamiento de su superficie real al de un paraboloides de revolución perfecto está en el décimo de λ , esto pone un límite superior a la frecuencia de trabajo admisible en un reflector determinado. Hoy existen grandes reflectores que trabajan con ondas de 0.8 mm de longitud de onda, y la precisión de sus superficies se asemeja a la de un instrumento óptico.

Diagrama de radiación

Las antenas están diseñadas para recibir la señal procedente de un punto localizado del cielo. Por este motivo, la respuesta de la antena a la radiación es diferente según la dirección de la que proceda esta radiación. El estado ideal sería aquel en el que recibiésemos únicamente señal de una fuente cuando la antena estuviera apuntando a esa fuente, sin recibir radiación de ningún otro punto del cielo.

Desafortunadamente, este estado ideal no coincide con la realidad. En realidad, las antenas reciben también radiación de zonas que pueden estar muy alejadas del punto que se quiere observar. Esto es debido, en parte, a la difracción de la radiación que llega al borde del reflector.

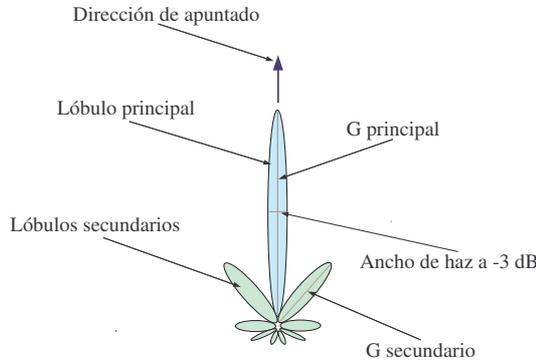


Figura 3.4: Diagrama polar y sus características

Para representar la respuesta de la antena a la radiación, se utiliza el llamado diagrama polar (ver Figura 3.4). En él se representa un esquema de la cantidad de radiación recibida por la antena procedente de cada zona del cielo (de cada dirección del espacio), cuando la antena apunta a un punto determinado. En la Figura 3.4 suponemos que la antena está apuntando en la dirección de la línea azul. Los lóbulos azules indican la cantidad de radiación que recibiría la antena de cada punto del cielo. El máximo de esta radiación se obtiene en el punto hacia el que está orientada la antena, que es el máximo del denominado *lóbulo principal*. El ángulo entre los puntos del lóbulo principal en los que la intensidad recibida es la mitad del máximo se llama *ancho de haz a -3dB* ($\Delta\theta_{-3dB}$).

Ligado a este parámetro se encuentra el poder de resolución del radiotelescopio (*PDR*) que matemáticamente se define:

$$PDR \propto \frac{1}{\Delta\theta_{-3dB}} \quad (3.12)$$

Cuanto mayor sea el diámetro del reflector, más directivo será el diagrama de radiación de la antena (más estrecho será su lóbulo principal) y en consecuencia se tendrá un mayor *PDR*, pudiendo realizar observaciones más detalladas en las que, por ejemplo, se muestren separadas aquellas fuentes que verdaderamente lo están o se puedan realizar medidas de intensidad de la fuente.

Otro factor que caracteriza un diagrama de radiación es la relación entre las magnitudes del lóbulo principal y los lóbulos secundarios. Así, se define:

$$NLPS = \frac{G_{principal}}{G_{secundarios}} \quad (3.13)$$

Para aplicaciones de Radioastronomía interesa trabajar con antenas que presenten una elevada *NLPS*. De este modo, prácticamente toda la potencia recibida corresponderá a

la fuente observada, dado que la potencia recibida por la antena a través de los lóbulos secundarios será despreciable en comparación con la potencia recibida a través del lóbulo principal.

Polarización

La polarización de las ondas electromagnéticas está definida por el vector de campo eléctrico $E(x, y, z, t)$. La orientación del vector de campo en una posición fija del espacio en función del tiempo es lo que se conoce como polarización del campo. Si este vector forma un ángulo constante con el horizonte, se dice que las ondas están *linealmente polarizadas*.

En Radioastronomía, cuando una onda está linealmente polarizada y su vector de campo eléctrico es paralelo a la superficie de la Tierra se dice que se trata de una polarización horizontal. Cuando, por el contrario, la polarización se produce en un plano perpendicular al horizonte decimos que se trata de polarización vertical.

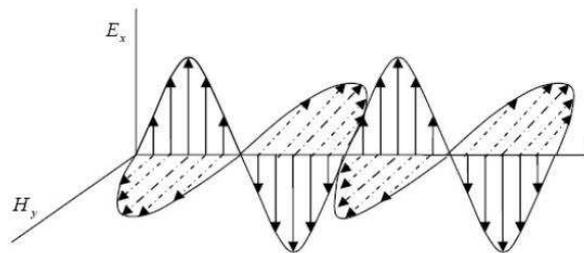


Figura 3.5: Onda polarizada linealmente (verticalmente)

Las ondas también pueden estar *circularmente polarizadas* si el vector de campo eléctrico rota alrededor de la dirección de propagación de la onda. La rotación puede ser dextrógira, cuando para un observador que mira la onda en el sentido de la propagación, ésta rota en el sentido de las agujas del reloj, o levógira, cuando el mismo observador ve la onda girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

Las ondas de radio procedentes de fuentes extraterrestres pueden estar polarizadas - linealmente o circularmente o incluso puede ser una mezcla de ambas. Las propiedades de polarización de las ondas electromagnéticas proporcionan información complementaria sobre los procesos físicos que tienen lugar en la fuente de radiación.

En el caso de una antena parabólica de foco primario la polarización viene dada por el tipo de alimentador empleado. Para recibir la polarización lineal, bien vertical, bien horizontal, las bocinas o iluminadores se suelen alimentar con monopolos orientados verticalmente u horizontalmente, según se quiera recibir una polarización u otra. En el caso de querer recibir polarizaciones circulares los iluminadores pueden ser alimentados con espiras circulares.

Superficie del reflector

Otra característica importante de las antenas parabólicas es la superficie del reflector. Dependiendo de la frecuencia de trabajo, la superficie de éste ha de ser más o menos perfecta, admitiendo irregularidades del orden de $0,1\lambda$. Cuanto mayor sea la frecuencia de trabajo (menor la longitud de onda) más perfecta ha de ser la superficie reflectora. Por ejemplo, en el visible se emplean espejos pulidos como reflectores y para recepción de satélite (banda Ku, 10 GHz - 18 GHz) se emplean superficies metálicas homogéneas y lisas.

Para trabajar a 1420 MHz podemos tomarnos la licencia de emplear superficies reflectoras no tan perfectas y homogéneas. De hecho, es posible emplear mallas metálicas con pequeños agujeros como superficie reflectora, ya que, una onda electromagnética de 21 cm de longitud de onda se refleja del mismo modo (tan correctamente) en esta superficie como lo haría en una superficie de las empleadas para recepción de satélite (más perfecta y homogénea).

Este hecho permite emplear antenas de gran envergadura y, por otro lado, al disponer el reflector de pequeños agujeros por los que puede fluir el aire, la antena resultará más robusta a los fuertes vientos.

3.1.2. Sistema de motores

En ocasiones, cuando existe un desplazamiento considerable entre el punto de observación (donde se encuentra emplazada la antena del radiotelescopio) y la fuente a observar, se requiere realizar un seguimiento de la fuente observada. Es decir, se requiere que el máximo del lóbulo principal de la antena receptora se encuentre apuntando en todo momento a la radiofuente (algo similar al tracking de satélites).

En otro tipo de observaciones, cuando el radiotelescopio dispone de un gran poder de resolución (de una gran directividad), es posible realizar medidas de intensidad de la radiofuente. Este tipo de medidas consiste en ir realizando un barrido sobre la radiofuente e ir tomando muestras de la intensidad recibida en cada punto (ver Figura 3.6). Al final, a cada valor de intensidad se le asigna un color siguiendo una determinada escala y se obtiene un mapa de intensidad de la radiofuente.

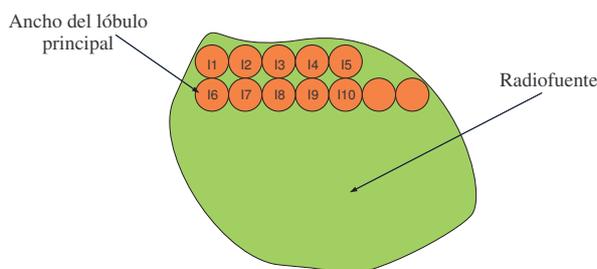


Figura 3.6: Medida de intensidades de una radiofuente

En ambos casos es necesario un sistema de motores que permita apuntar con la antena

a todos los puntos del cielo.

En Astronomía se emplean diferentes sistemas de coordenadas para situar los cuerpos celestes en el espacio, uno de estos sistemas es el *sistema de coordenadas altazimutal*. Las coordenadas altacimutales utilizan dos planos fundamentales: la *altura* y el *acimut*. El acimut (abreviado *AZ* por su denominación en inglés, Azimut), se mide desde el punto cardinal Norte hacia el Este. Así es como suele aparecer en la literatura, pero en realidad, si el observador se encuentra ubicado en el hemisferio Sur, se mide al revés, desde el Sur hacia el Oeste.

La altura o elevación (*EL*) se mide desde el horizonte (0°) hasta el *cenit* (90°), por tanto esta coordenada es el ángulo que forma el objeto observado con el horizonte. Se habla de una altura negativa cuando el objeto se encuentra por debajo del horizonte, el punto a 90° por debajo del horizonte ($EL = -90^\circ$) se denomina *nadir*.

Al tratarse de un sistema de coordenadas que utiliza valores locales (horizonte y altura sobre el horizonte) el valor de esas coordenadas para un objeto dado depende de la posición del observador.

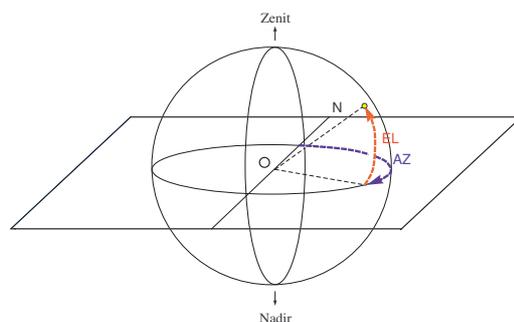


Figura 3.7: Sistema de coordenadas altazimutal

Entonces, con un sistema formado por dos motores: uno de ellos capaz de desplazar la antena en acimut (permitiendo un desplazamiento angular de 360°) y otro capaz de desplazar la antena en elevación (permitiendo un desplazamiento angular de 90°), seremos capaces de enfocar con la antena a las distintas fuentes presentes en “nuestro cielo”.

El sistema de motores debe ser controlado por un ordenador. Para ello, se requiere de un *controlador* que traduzca los valores de coordenadas *AZ* y *EL* introducidas en el ordenador en una serie de impulsos eléctricos que activen los motores eléctricos. El tipo de motores que se suele emplear para este tipo de aplicaciones recibe el nombre de motores paso-paso².

El sistema de motores a emplear en el radiotelescopio ha de presentar una serie de características:

- La precisión angular de los motores, tanto en *AZ* como *EL*, ha de ser menor que el ancho de haz del patrón de radiación de la antena. De este modo, con la antena apuntando a un determinado punto del cielo, será necesario que los motores reciban varios

²Este tipo de motores son empleados en multitud de aplicaciones de la industria y tienen la peculiaridad de que responden con cortos y precisos movimientos a impulsos eléctricos de corriente continua (DC, *Direct Current*).

impulsos seguidos para que la antena apunte al siguiente punto diferenciable más cercano al anterior. Así, la resolución angular de nuestro radiotelescopio vendrá limitada por el ancho del lóbulo principal de la antena y no por la precisión angular del sistema de motores.

- El sistema de motores ha de presentar el suficiente par (la suficiente fuerza) como para mover la antena sin demasiado esfuerzo. No solo debe ser capaz de soportar la carga estática, la debida al peso de la antena, sino también debe ser robusto a la carga dinámica, cuando la antena se encuentra en movimiento y recibe fuertes vientos y fuerzas externas.
- Puesto que el radiotelescopio se emplaza al aire libre, el sistema de motores ha de ser robusto a las inclemencias meteorológicas y a la corrosión.
- El controlador del sistema de motores ha de ser compatible con el ordenador empleado para controlar los motores, generalmente se suele emplear la interfaz RS-232 para conectar el ordenador y el controlador.

3.1.3. Dispositivos de acondicionamiento de señal

En la Figura 3.8 puede verse un esquema más detallado del Radiotelescopio de la UPCT. Como se puede observar, se emplean dos receptores distintos: un receptor comercial y un receptor-entrenador diseñado y fabricado por alumnos de la UPCT en tecnología microstrip. Será necesario emplear un divisor de potencia (1x2 en el esquema) para llevar la señal recibida por la antena a ambos receptores.

Aparte de los receptores ya mencionados, es necesario realizar una amplificación y filtrado previo. De estas tareas se encargan los amplificadores de bajo ruido (LNAs) y los filtros paso-banda (BPF, *Band Pass Filter*).

Para conectar los distintos dispositivos que aparecen en el esquema se emplean líneas de transmisión de características determinadas.

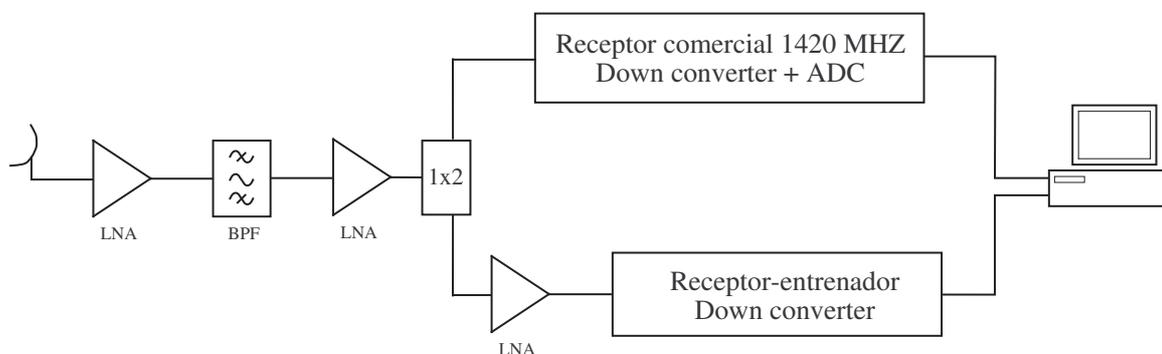


Figura 3.8: Esquema detallado del Radiotelescopio de la UPCT

El lector puede recurrir a [5] para obtener más información acerca de sistemas óptimos para aplicaciones de Radioastronomía.

Amplificadores de bajo ruido

Recordemos que las señales con las que se trabaja en Radioastronomía son muy débiles, de muy baja potencia, comparable en ocasiones al ruido térmico inherente a todo sistema de telecomunicaciones, por ésto, la señal recibida por la antena ha de ser amplificada cientos de veces antes de ser introducida en los receptores. Esta amplificación se ha de llevar a cabo introduciendo el mínimo ruido posible, evitando una posible distorsión o pérdida de la información.

Se requerirán tantos LNAs como sea necesario para garantizar los niveles de potencia mínimos requeridos a la entrada de ambos receptores. El orden en que se colocan los dispositivos de acondicionamiento de señal que aparece en el esquema no se debe a una cuestión arbitraria. Las ecuaciones 3.14 y 3.15 son conocidas como *fórmulas de Friis* y se emplean para calcular la ganancia equivalente (G) y la figura de ruido equivalente (F) de una asociación en cascada de n dispositivos.

$$G = G_1 G_2 G_3 G_4 \dots G_{n-1} G_n \quad (3.14)$$

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \quad (3.15)$$

Las ecuaciones anteriores vienen a decir lo siguiente: “*Cuando se quiera diseñar un sistema receptor que presente la máxima ganancia y la mínima figura de ruido, las primeras etapas han de ser aquellas que presenten las mayores ganancias y las menores figuras de ruido*”.

Es por ésto por lo que se colocan los LNAs en las primeras etapas del sistema receptor, ya que estos dispositivos presentan elevadas ganancias y bajas figuras de ruido.

Los LNAs a emplear han de estar optimizados para trabajar en la banda de 1420 MHz, ésto es, deben amplificar fuertemente esas frecuencias con gran adaptación, evitando reflexiones.

Una cuestión muy a tener en cuenta para que se puedan realizar veraces observaciones con el radiotelescopio, es garantizar en todas las etapas del sistema receptor una elevada relación señal a ruido³ (SNR, *Signal Noise Relation*) que se puede calcular como $SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$. Al emplear LNAs se mejora la SNR del sistema.

La potencia de ruido que introduce un dispositivo depende en gran medida de la temperatura a la que éste se encuentre, por ésto, para reducir los efectos indeseados del ruido, se emplean técnicas de criogenización u otras técnicas basadas en electrónica de termopares con las que se someten a los dispositivos a muy bajas temperaturas, de este modo la agitación electrónica disminuye y la figura de ruido de éstos se reduce considerablemente. De nuevo, atendiendo a la formula de Friis, se deduce que es en las primeras etapas en las que sería conveniente emplear dichas técnicas.

³Se puede entender el ruido como una perturbación eléctrica (señal no deseada) que al superponerse sobre la señal deseada o señal útil impone un límite a la calidad de funcionamiento del sistema receptor.

Filtros paso banda

Los filtros paso banda representan un elemento de vital importancia en la mayoría de receptores. Existen múltiples tipos de filtros: Cuando interese quedarnos exclusivamente con señales de frecuencia inferior a una frecuencia de corte f_c emplearemos filtros paso-bajo. Cuando lo que se quiere es disponer solo de señales de frecuencias superiores a una determinada frecuencia de corte f_c se emplean filtros paso-alto. Y si lo que se pretende es disponer únicamente de señales con un determinado rango de frecuencias se emplean filtros paso-banda (BPF, *Band Pass Filter*).

En bornes de la antena de un radiotelescopio (como en los de cualquier antena) se reciben múltiples señales de diferentes frecuencias a parte de la de interés (la emisión de HI 1420 MHz). Por tanto, se requiere de un filtro paso-banda de entrada sintonizado a 1420 MHz, cuya finalidad principal es la de dejar pasar las frecuencias de interés, próximas a 1420 MHz, y evitar la entrada al circuito receptor de otras frecuencias. Además, al colocar un filtro de entrada con un ancho de banda determinado, B , se logra limitar la potencia de ruido de entrada en el receptor.

En la UPCT se dispone de los conocimientos y de la tecnología necesaria para diseñar y fabricar filtros de microondas. En el siguiente capítulo se dedica una sección al diseño y fabricación de un filtro paso-banda en tecnología microstrip sintonizado a 1420 MHz.

Para recepción de satélite se suele emplear un dispositivo conocido como LNB (*Low Noise Block*) que se coloca en el foco de la antena parabólica y, que no es otra cosa que lo que en el esquema de la Figura 3.8 se muestra: una bocina a la que se le conecta una asociación en cascada de LNAs y BPFs. Algunos LNBs incluyen una etapa *Down Converter* con la que se realiza una bajada en frecuencia de la señal recibida, pudiendo entonces ser transmitida por un cable coaxial con menor atenuación.

Divisor de potencia

Puesto que se emplean dos receptores distintos, es necesario dividir en dos la señal procedente de la antena. Algo similar ocurre en un edificio en el que se quiere llevar la señal de TV procedente de una antena comunitaria a todos los vecinos.

Un divisor es un dispositivo pasivo formado por un puerto de entrada y dos puertos de salida. En un caso ideal, exento de pérdidas, la mitad de la señal introducida por el puerto de entrada sale por un puerto de salida y la otra mitad sale por el otro.

En general, un divisor también puede ser empleado como combinador, es decir, se pueden emplear los puertos de salida para introducir dos señales y que éstas salgan combinadas por el puerto de entrada.

La colocación de este dispositivo en el esquema tampoco se debe a una cuestión arbitraria. Colocarlo inmediatamente tras la bocina no sería una buena elección, pues se requeriría emplear más LNAs y BPFs de los necesarios. Colocarlo inmediatamente antes de ambos receptores solo sería adecuado para el caso en el ambos tuvieran la misma sensibilidad, es decir, en

el caso en que ambos receptores necesitaran del mismo nivel de potencia a su entrada para funcionar correctamente. Adelantamos que la sensibilidad del receptor comercial será mayor que la del receptor-entrenador, es decir, será capaz de trabajar correctamente con un nivel de potencia menor a su entrada. Por este motivo será necesario emplear una serie de LNAs tras una de las salidas del divisor para garantizar los niveles de potencia requeridos a la entrada del receptor-entrenador.

Por supuesto, para respetar la adaptación de todo el sistema receptor, las impedancias de entrada y salida de este dispositivo han de ser de 50Ω .

Líneas de transmisión

La antena receptora y el resto de equipos estarán ubicados en sitios diferentes. Por tanto, es necesario disponer de líneas de transmisión con las que conectar las distintas etapas del sistema receptor.

El cable coaxial es una línea de transmisión utilizada para transportar señales eléctricas de alta frecuencia que posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado *positivo* o *vivo*, encargado de llevar la información, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado *malla* o *blindaje*, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes. Entre ambos se encuentra una capa aislante llamada dieléctrico, de cuyas características dependerá principalmente la calidad del cable. Todo el conjunto suele estar protegido por una cubierta aislante.

Para el caso que nos ocupa, el cable coaxial a emplear ha de ser de altas prestaciones, presentando unas bajas pérdidas y una gran robustez frente a interferencias electromagnéticas, así como una gran resistencia a las inclemencias meteorológicas que le confiera una larga durabilidad.

A pesar de emplear cables de altas prestaciones, la señal proveniente de la antena a 1420 MHz es susceptible a sufrir grandes atenuaciones en el momento en que es introducida en ellos, por este motivo se coloca un LNA criogenizado inmediatamente detrás de la bocina, sin emplear ningún cable previo. Este primer LNA, entre otras cosas, permite compensar las pérdidas que se produzcan en la línea de transmisión que transporta la señal hacia los receptores.

Puesto que todos los dispositivos que se van a interconectar (bocina, LNAs, BPF, divisor y receptores) presentan una impedancia de entrada de 50Ω , el cable coaxial a emplear ha de presentar una impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$. Los cables dispondrán de conectores tipo N de 50Ω con los que conectar los distintos dispositivos.

Una vez se ha realizado la bajada en frecuencia de la señal recibida, ya no es necesario disponer de líneas de transmisión de tan altas prestaciones. Así, por ejemplo, el cable coaxial a emplear para transportar la señal de salida del receptor-entrenador a una tarjeta de adquisición puede ser de peores prestaciones que el que se emplea para llevar la señal procedente de la antena a los receptores, incluso la longitud de éste ya no representa una cuestión crítica.

3.1.4. Receptor comercial

Ya se ha mencionado que alumnos y profesores de la UPCT han diseñado y fabricado un receptor-entrenador en tecnología microstrip que será empleado en el Radiotelescopio y que servirá como herramienta docente, con la que alumnos y resto de público puedan visualizar y comprender el procesado hardware que sufre la señal desde que es recibida por la antena hasta que es mostrada en un ordenador (el siguiente capítulo trata sobre el diseño y fabricación de este receptor-entrenador).

Al margen de esto, se requiere de un receptor de microondas comercial. Este receptor de microondas ha de estar optimizado para trabajar con señales de 1420 MHz y entre sus funciones y características destacan las siguientes:

- Debe incorporar una etapa de bajada en frecuencia (*Down converter*). Cuando se trabaja con señales de elevada frecuencia (por ejemplo, la línea de HI a 1420 MHz) surgen varios problemas: Uno de ellos es que al tratarse de señales muy rápidas en el tiempo su proceso de digitalización es complicado, pues implica tomar muestras de la señal a una tasa muy elevada. Otro problema se debe a que al introducir una señal de elevada frecuencia en un cable u otro tipo de línea de transmisión ésta sufre una gran atenuación, produciéndose una pérdida de información.
- Debe incorporar una etapa de conversión analógico-digital (ADC, *Analog Digital Converter*) con la que digitalizar la señal analógica correspondiente a la emisión HI. Una vez digitalizada la señal, será sencillo visualizarla y realizar un procesado software con un ordenador.
- Puesto que el receptor va a ser empleado en aplicaciones de Radioastronomía, éste ha de presentar una elevada sensibilidad, es decir, ha de poder trabajar con bajas potencias de entrada. Para ello, deberá incluir LNAs en su interior. Además, es necesario que el receptor presente una baja figura de ruido.
- En Radioastronomía, una actividad muy importante y que permite realizar observaciones más veraces y correctas es *la calibración*. Cuando recibimos y procesamos la señal recibida por la antena, en realidad, no solo estamos procesando la señal que recibimos de la radiofuente que estamos apuntando, sino que aparecen superpuestas otras señales no deseadas en forma de ruido y, además, estamos amplificando e introduciendo modificaciones sobre la señal original. Así, que lo que estamos midiendo no es exactamente la señal emitida por la radiofuente sino una versión modificada de ésta. Con la calibración, empleando fuentes de ruido conocidas que de alguna manera modelen las perturbaciones sufridas por la señal y mediante procesos de sustracción, se logra paliar estos efectos. Por estas razones, sería conveniente que el receptor comercial dispusiera de una entrada de calibración.
- Entre las prácticas que se van a realizar con el Radiotelescopio de la UPCT se encuentra el visualizar el espectro de emisión de HI de un radiofuente, resulta interesante por tanto que el receptor comercial disponga de un canal de salida en el que se muestre la señal recibida en el tiempo y un canal en el que se muestre la señal recibida en frecuencia.
- Para respetar la adaptación total del sistema el receptor debe presentar una impedancia de entrada de 50Ω .

3.2. Necesidades de ubicación

Llegados a este punto se hace necesaria una ubicación física donde instalar el Radiotelescopio. El lugar elegido debe satisfacer una serie de características que lo conviertan en un lugar apropiado para tal efecto:

Resulta obvio que la antena receptora haya de instalarse en un lugar abierto, con un cielo despejado desde el que se puedan realizar buenas observaciones. Del mismo modo que observatorios ópticos son ubicados en lugares alejados de la contaminación lumínica, los radiotelescopios han de instalarse en lugares libres de interferencias electromagnéticas.

Recordemos que, al trabajar con señales de elevada frecuencia, no conviene emplear largos cables para conectar la antena al resto de equipos, por ésto, se requiere de un espacio relativamente amplio, donde la antena parabólica pueda moverse libremente y, en el que además, se pueda emplazar un pequeño *centro de control* próximo a la antena en la que instalar los receptores, ordenadores y resto de equipos.

La ubicación del radiotelescopio debe estar próxima a la ETSIT por varios motivos: se pretende instalar en una de sus aulas un aula-taller en la que divulgar los estudios realizados con el Radiotelescopio de la UPCT y la Radioastronomía en general, así como la tecnología que esta ciencia lleva asociada. Por otro lado, el que se instale una antena parabólica de gran diámetro en las inmediaciones de la ETSIT, sin duda supone un gran atractivo visual que despertaría el interés del alumnado y público en general.

Por estos motivos, la azotea del nuevo edificio I+D+I de la UPCT parece ser un lugar idóneo para emplazar el Radiotelescopio: se encuentra muy próximo a la ETSIT, dispone de un cielo despejado, se tiene un fácil acceso y sería posible realizar visitas a este edificio para enseñar las instalaciones. Además, paralelo a este proyecto, compañeros de la UPCT quieren colocar en la misma azotea un observatorio óptico. Ésto resultará de gran interés, pues permitirá un trabajo conjunto, en el que se podrá estudiar el Universo en sus distintos rangos de emisión.

En la Figura 3.9 se muestra una imagen de satélite en la que se localiza el edificio I+D+I junto a la ETSIT de la UPCT. La Figura 3.10 muestra un plano de la azotea de este edificio y una posible estructura para la antena receptora.



Figura 3.9: Localización del Radiotelescopio de la UPCT. Cortesía de Google Maps

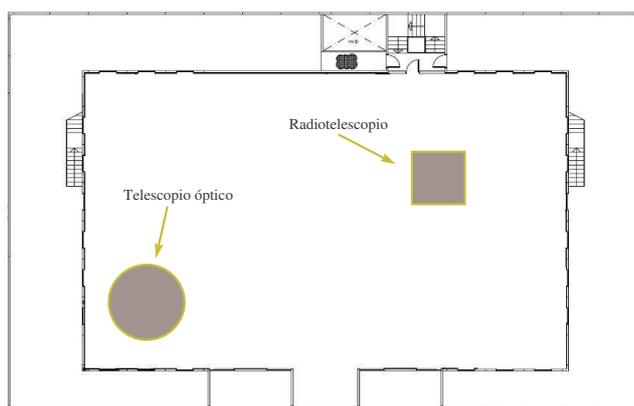


Figura 3.10: Planta de la azotea del nuevo edificio I+D+I de la UPCT

Hemos hablado de la importancia que tiene que el lugar donde se emplace un radiotelescopio se encuentre libre de interferencias electromagnéticas. Por este motivo, se realizó un análisis del espectro electromagnético en la azotea del edificio I+D+I. Para ello se empleó el analizador de espectros y redes vectoriales Rohde&Schwarz ZVL6 y una antena bicónica de gran ancho de banda. Los resultados que de este estudio se desprendieron se muestran en la Figura 3.11 donde se puede observar que la banda de 1420 MHz se encuentra libre de interferencias electromagnéticas (al menos para la antena y el analizador empleados).

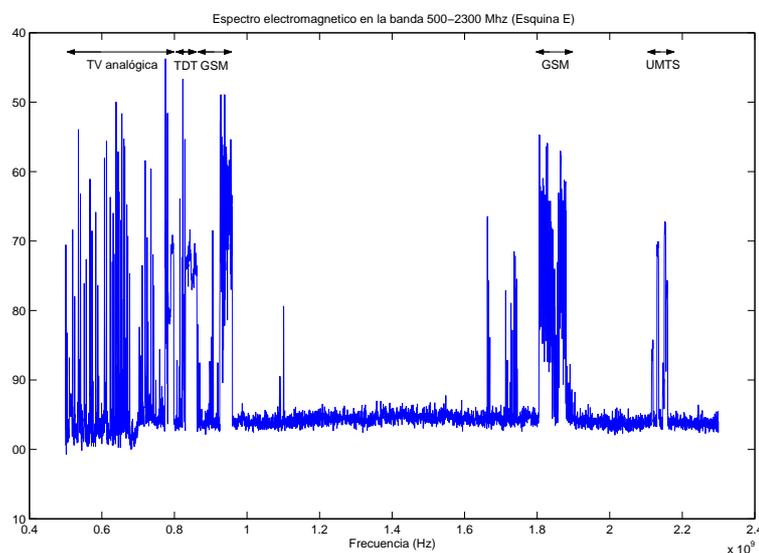


Figura 3.11: Espectro electromagnético medido en la azotea del edificio I+D+I de la UPCT

Compañeros de la facultad de Física de la Universidad de Valencia nos informaron de que con su radiotelescopio detectaban una interferencia que les impedía realizar buenas observaciones. Ellos, aunque grandes conocedores de la Radioastronomía y la Astronomía en general, no disponen de los conocimientos ni de la tecnología necesaria para detectar y combatir dicha interferencia. Por este motivo, compañeros de la UPCT realizamos un estudio de esta interferencia y elaboramos un informe en el que se planteaban posibles soluciones a dicha interferencia.

Estos informes se anexan al final de esta memoria y se recomienda al lector que recurra a ellos, pues podrá encontrar múltiple información sobre el análisis de espectros, así como imágenes en las que se muestran los espectros característicos de algunos de los servicios comerciales de radiofrecuencia que emplea en su vida cotidiana.

3.3. Búsqueda y compra de equipos

Una de las características que diferencia al Radiotelescopio de la UPCT de otros radiotelescopios amateur es que en éste, gran parte de la tecnología empleada es diseñada y fabricada por alumnos y profesores de la UPCT. Aún así, en ocasiones, por falta de medios, nos encontramos ante la imposibilidad de fabricar algunos de los equipos necesarios.

En esta sección se trata todo lo que tuvo que ver con la búsqueda y compra de equipos en empresas ajenas a la UPCT, así como su posterior testeo con el que comprobar que cumplían con las especificaciones requeridas.

3.3.1. Búsqueda y compra de la antena receptora

Al principio de este capítulo se expusieron los motivos por los que la antena receptora del radiotelescopio debía ser una antena parabólica de gran diámetro. Recordemos que esto suponía tener gran sensibilidad, pues se dispondría de un área colectora grande, y de un gran poder de resolución, pues el lóbulo principal del patrón de radiación de la antena sería estrecho. En este sentido, en un principio se barajó la posibilidad de emplear una antena parabólica de cinco metros de diámetro.

Desafortunadamente, en la UPCT no se disponía de las herramientas y medios necesarios para construir una antena parabólica de tal envergadura. Por este motivo se decidió adquirir la antena receptora en empresas ajenas a la UPCT.

La búsqueda de la antena receptora comenzó por empresas nacionales del sector de las telecomunicaciones, pero adquirir una antena parabólica de estas características en España resulta complicado, pues la tradición que aquí se tiene en recepción de satélite es temprana. Hace algunos años, los satélites no eran tan eficientes como lo son ahora que, con una pequeña antena parabólica como las que cuelgan de nuestros edificios somos capaces de recibir varios de ellos. Este hecho suponía que para poder recibir señales de satélite se tuvieran que emplear antenas parabólicas de gran diámetro (sensibles y directivas) como las que se emplean en Radioastronomía. De este modo, hubo que recurrir a mercados extranjeros con mayor tradición en recepción de satélite para adquirir la antena que buscábamos.

Compañeros de la Universidad de Valencia habían adquirido años antes un kit⁴ de Radioastronomía diseñado y fabricado por ingenieros del Haystack Observatory del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) y comercializado por CASSI Corp. Este kit que, estaba

⁴El lector puede obtener más información sobre este kit en la web <http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/index.html>

dirigido a investigadores y astrónomos amateur, incluía una antena receptora de siete pies de diámetro (2.1 m de diámetro aproximadamente) montado sobre un sistema de motores altazimutal y un receptor digital. Esta opción de compra resultaba bastante tentadora, pues se adaptaba bastante a nuestras necesidades y de un solo pedido se veían cubiertas gran parte de ellas.



Figura 3.12: Radiotelescopio de la Facultad de Física de la Universidad de Valencia

En este contexto, por el interés de conocer este kit y con el propósito de iniciar un trabajo conjunto y multidisciplinar con otras universidades, realizamos una visita a la Facultad de Física de la Universidad de Valencia. Allí pudimos estudiar las ventajas e inconvenientes que tenía adquirir este kit y decidimos buscar otras opciones distintas que se adaptaran mejor a nuestras necesidades. Recordemos que el Radiotelescopio de la UPCT pretende ser un sistema abierto, capaz de adaptarse a nuevas necesidades e incluir nuevas mejoras, en este sentido, adquirir un kit en el que todo viene integrado y diseñado resultaba poco versátil.

La búsqueda de la antena receptora siguió realizándose a través de Internet hasta que se encontró la empresa holandesa RF HAMDESIGN⁵ dedicada al equipamiento de RF que comercializaba una antena parabólica que se adaptaba muy bien a nuestras necesidades.

Se trataba de una antena parabólica de foco primario de 3 metros de diámetro con una relación $f/D = 0,4$. La estructura del reflector estaba construida íntegramente en aluminio y como superficie reflectora se empleaba una rejilla metálica lo que le hacía tener un peso aproximado de 39 Kg. El Cuadro 3.1 muestra las características de radiación de esta antena

⁵El lector puede acceder a la web de esta empresa a través de <http://www.rfhamdesign.com/>

para varias frecuencias de trabajo. Puede comprobarse cómo a mayores frecuencias de trabajo más ganancia presenta la antena y más estrecho es el lóbulo principal de su patrón de radiación (más directiva se hace la antena).

Frecuencia	Ganancia (dBd)	$\Delta\theta_{-3dB}$
1296 MHz	30.3	5.7°
2320 MHz	35.4	3.2°
3456 MHz	38.8	2.1°
5760 MHz	43.3	1.3°

Cuadro 3.1: Características de radiación de la antena receptora del Radiotelescopio de la UPCT

Las características de radiación para la frecuencia de 1420 Mhz se pueden estimar a partir de los datos del Cuadro 3.1. Puesto que se trata de una frecuencia ligeramente superior a 1296 MHz se estima que nuestra antena presentará una ganancia aproximada 32 dBd y un ancho de haz $\Delta\theta_{-3dB} = 5^\circ$. Con estas características solo seremos capaces de distinguir radiofuentes con separaciones angulares mayores que 5° y aquellas cuya separación angular sea menor las veremos como algo puntual.



Figura 3.13: Reflector parabólico de 3 m de diámetro. Cortesía de RF HAMDESIGN

Recordemos que una antena parabólica está formada por un reflector parabólico y un alimentador o bocina. También adquirimos en esta misma empresa dos bocinas diferentes, ambas optimizadas para trabajar en la banda de 1420 MHz: una bocina con polarización lineal, que podrá ser empleada para recibir polarización vertical u horizontal según se oriente el monopolo alimentador (o cualquier otra polarización lineal), y una bocina con polarización circular levógira (a la derecha de la Figura 4.6).



Figura 3.14: Bocinas adquiridas en RF HAMDESIGN

Al final de esta memoria se anexan copias de las facturas de compra de todos los equipos adquiridos en empresas ajenas a la UPCT.

3.3.2. Búsqueda y compra del sistema de motores

También se optó por adquirir el sistema de motores de la antena receptora en una empresa externa a la UPCT. Al principio de este capítulo se expusieron las características que éste tenía que tener. El sistema de motores debería responder al sistema de coordenadas altazimutal, es decir, debía disponer de un motor que controlará la elevación de la antena y otro motor que controlará el acimut. Recordemos que era importante que el sistema de motores tuviera una precisión angular mayor que el poder de resolución de la antena receptora, de modo que la resolución angular del radiotelescopio viniera limitada por la antena y no por el sistema de motores.

La búsqueda del sistema de motores también se realizó a través de Internet, dando prioridad a empresas nacionales con el fin de evitar elevados gastos de envío. Aún así, resultaba complicado adquirir un sistema de motores que se adaptará perfectamente a nuestras necesidades y a nuestro presupuesto.

La mayoría de los modelos que encontré se empleaban para aplicaciones de tracking de satélites y aplicaciones de telemetría. Estos sistemas ofrecían grandes precisiones angulares, más de lo que necesitábamos. Ésto tiene su sentido, pues eran los encargados de mover grandes antenas parabólicas que trabajan a elevadas frecuencias, es decir, debían mover con gran precisión antenas muy directivas. El problema de estas alternativas era su elevado precio, que se alejaba de nuestras posibilidades.

Otra alternativa de compra fue los sistemas de motores empleados para orientar las placas

solares. Estos motores se comercializaban en España pero también tenían un elevado precio y en ocasiones no permitían toda la movilidad requerida (360° en acimut y 90° en elevación).

La búsqueda continuó sin éxito hasta que, finalmente, también en RF HAMDESIGN encontramos un modelo que se adaptaba perfectamente a nuestras necesidades. No tenía un precio prohibitivo y además era compatible con la antena que habíamos elegido. Por otro lado, el adquirir varios equipos a un mismo proveedor que nos había ofrecido confianza nos parecía algo aconsejable, así que lo incluimos en el pedido.



Figura 3.15: Sistema de motores AZ/EL empleado en el Radiotelescopio de la UPCT

El sistema de motores adquirido es modelo BIG-AZ & EL ROTOR y tiene las siguientes características:

- Dispone de dos motores paso-paso, uno par el acimut y otro para la elevación. Ambos funcionan con 24 V de DC.
- La precisión del sistema de motores es de 0.5° , es decir, por cada pulso que reciba el motor de elevación la antena se desplazará 0.5° (lo mismo ocurre con el motor de acimut).
- Dispone del suficiente torque para desplazar con suavidad la antena del radiotelescopio, con el empleo de contrapesos es posible emplearlo con antenas de más de 5 metros de diámetro.
- Tiene un peso de 22 Kg.
- Emplea ocho cables distintos, cuatro para controlar cada motor.
- Está construido en duraluminio, lo que le confiere gran robustez frente a la corrosión y otros agentes.

Recordemos que los motores paso-paso funcionan con impulsos de DC y se requiere de un controlador que se encargue de generar estos impulsos a petición del usuario. La empresa RF HAMDESIGN nos proporcionó el controlador de los motores, se trata del modelo BIG-RAS AZ & EL ROTOR CONTROLLER.

El controlador adquirido tiene una precisión de 0.5° y permite un control total de la orientación de la antena. Se puede llevar a cabo un control manual, bien empleando los controles de su panel frontal (ver Figura 3.16) o bien empleando un ratón de ordenador. Además, es posible realizar un control de la antena mediante software, para ello se emplea la interfaz RS-232. El controlador incluye un software comercial Orbitron para tracking de satélites.



Figura 3.16: Controlador del sistema de motores empleado en el Radiotelescopio de la UPCT

También fue necesario adquirir dos fuentes de alimentación DC que proporcionaran los 24 V requeridos por los motores, así como los cables de alimentación que conectan el controlador (que se ubica dentro del *centro de control*) con el sistema de motores (en el exterior, sobre el mástil de la antena).

3.3.3. Búsqueda y compra del receptor comercial y dispositivos de acondicionamiento de señal

En la ETSIT de la UPCT se dispone de conocimientos y medios suficientes para desarrollar dispositivos de microondas y RF: filtros, amplificadores, mezcladores, osciladores, antenas, etc. De hecho, diferentes alumnos han basado sus PFCs en el diseño y fabricación de dispositivos de microondas optimizados para trabajar en la banda de 1420 MHz con el fin de emplearse como parte del Radiotelescopio de la UPCT. Parte de estos dispositivos serán integrados para formar el receptor-entrenador que se ha mencionado en varias ocasiones y al que se le dedica el capítulo siguiente.

Aún así, con el fin de poder comprobar resultados y probar diferentes tecnologías comerciales se recurrió a empresas externas a la UPCT para adquirir un receptor comercial optimizado para trabajar con la línea de HI y el resto de dispositivos de acondicionamiento de señal que se necesitan: LNAs, filtros paso-banda, divisores, cableado, etc.

La búsqueda y compra de estos dispositivos se llevo a cabo a través de Internet en empresas dedicadas a la fabricación y venta de dispositivos y equipamiento de RF y microondas. Recordemos que para aplicaciones de Radioastronomía los dispositivos empleados deben tener unas características concretas: grandes sensibilidades, pues han de trabajar con señales de muy baja potencia, y han de ser muy poco ruidosos.

Se encontró una empresa de USA dedicada al diseño, fabricación y comercialización de dispositivos de Radioastronomía. La empresa se denomina RADIO ASTRONOMY SUPPLIES⁶ (en adelante, RAS), en esta empresa se puede encontrar un gran surtido de dispositivos para

⁶El lector puede acceder a la web de esta empresa a través de <http://www.radioastronomysupplies.com/>

Radioastronomía amateur. En RAS disponían de todos los dispositivos que necesitábamos y anunciaban buenas prestaciones. Además, se había recurrido a ellos en otras ocasiones para adquirir alguno de sus dispositivos. Por estos motivos adquirimos en RAS todo lo que necesitábamos.

Receptor comercial

El receptor comercial adquirido fue el Spectra Cyber 1420 MHz Hydrogen Line Spectrometer. Se trata de un receptor de elevada sensibilidad y baja figura de ruido (1 dB aproximadamente según fabricante). Está basado en una triple bajada en frecuencia para lo que se emplean tres osciladores locales distintos, el tercero de ellos es controlado mediante software. Dispone de una etapa de conversión analógico-digital y de dos canales de salida diferentes: en uno de ellos se muestra la señal en el dominio temporal y en el otro, un espectrómetro, se muestra la señal en el dominio de la frecuencia. El ancho de banda de estos canales es de 15 MHz y 10 KHz respectivamente.

Desde un ordenador, mediante un software que incluye el fabricante se puede visualizar y registrar los datos de los dos canales de salida, así como controlar distintos parámetros del receptor y de los canales de salida: tiempo de integración, frecuencia del tercer oscilador, ganancia y offset de ambos canales, etc.

Resulta interesante que el receptor realice una integración de la señal recibida por el siguiente motivo:

La señal recibida por la antena $r(t)$ se puede modelar como suma de la señal de interés $x(t)$ y un ruido aditivo $n(t)$. En general $n(t)$ será una variable aleatoria que también se podrá modelar como suma de distintas contribuciones de ruidos de diferente naturaleza. Parte de este ruido será ruido térmico de media nula, otra parte se deberá a la propia naturaleza aleatoria de la radiación, etc. Si el valor medio del ruido $n(t)$ es nulo (como suele ocurrir con estos ruidos), mediante técnicas de integración se pueden reducir los efectos del ruido. Recordemos que la integral de una función suma es igual a la suma de las integrales y el valor de la integral en un intervalo finito de una función continua o señal cuyo valor medio es cero también es cero. De modo que para el periodo de integración τ se cumple lo siguiente.

$$\int_{\tau} r(t)dt = \int_{\tau} (x(t) + n(t))dt = \int_{\tau} x(t)dt + \int_{\tau} n(t)dt = \int_{\tau} x(t)dt \quad (3.16)$$

Al final se puede obtener un valor promedio de la radiación recibida en cada intervalo de tiempo. Este valor medio será más veraz y estará menos afectado por el ruido, pues aquellos ruidos de media nula que se adhieran al sistema receptor no contribuirán a su valor.

Al margen de lo anterior, este receptor incluye una entrada de calibración externa. Con la ayuda de fuentes de ruido conocidas se podrá llevar a cabo calibraciones de las medidas y lograr que éstas sean más veraces.

El receptor dispone de un conector de entrada tipo N de 50 Ω . Al final de la memoria se

adjunta los *data sheet* y un manual del receptor. Puede verse el aspecto del receptor en la Figura 3.17.



Figura 3.17: Receptor comercial empleado en el Radiotelescopio de la UPCT

Dispositivos de acondicionamiento de señal

En RAS disponían de un LNA optimizado para trabajar con la línea de HI a 1420 MHz. Según el fabricante este dispositivo ofrece una ganancia de 33 dB y una figura de ruido en torno a 0.34 dB. Estas características son bastante buenas, como ejemplo, decir que alumnos de la UPCT han diseñado y fabricado LNAs y no logran conseguir figuras de ruido tan bajas. El dispositivo se debe polarizar con 12 V / 100mA DC.

Se adquirieron ocho LNAs como en de la Figura 3.18, aunque en realidad no sea necesario emplear tantos. Según el fabricante para que el receptor adquirido trabaje correctamente basta con emplear un LNA colocado inmediatamente tras la bocina. Aún así, el receptor-entrenador será menos sensible que el comercial y será necesario emplear algún LNA complementario para garantizar los niveles de señal requeridos (en torno a -20 dBm), de todos modos es conveniente disponer de varios LNAs de repuesto.



Figura 3.18: LNA empleado en el Radiotelescopio de la UPCT

Ya se comentó al principio del capítulo que para conseguir que nuestro sistema receptor fuera poco ruidoso, era conveniente someter a las primeras etapas a bajas temperaturas. En RAS comercializan un sistema para dicho fin. Se trata de un dispositivo basado en electrónica de termopares, en cuyo interior se genera una atmosfera termoeléctrica fría, así, colocando los primeros LNAs en dicha atmosfera se reduce la figura de ruido del sistema receptor. Este dispositivo irá colocado inmediatamente tras la bocina, sin empleo de ningún cable previo.



Figura 3.19: Sistema *cooler* de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT

También se adquirieron en RAS cuatro filtros paso banda interdigitales sintonizados a 1420 MHz. La misión de estos filtros es reducir el ancho de banda de trabajo del receptor, evitando la entrada de señales de frecuencias inferiores y superiores a 1420 MHz. Según el fabricante este filtro presenta una bajas pérdidas de inserción y un ancho de banda $BW_{-3dB} = 30\text{MHz}$. Con este ancho de banda es más que suficiente para recibir el espectro de HI, este espectro se encontrará centrado a 1420 MHz y presentará cierta anchura espectral debido al *efecto Doppler*⁷. Se puede ver un perfil característico de HI a la derecha en la Figura 3.20.

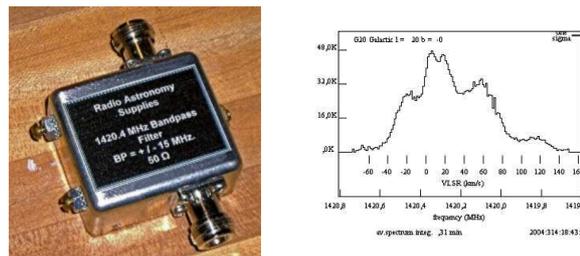


Figura 3.20: Filtro paso-banda y perfil de HI característico. Cortesía de la UV



Figura 3.21: Fuente de ruido del Radiotelescopio de la UPCT

Para llevar a cabo calibración también se adquirió en RAS la fuente de ruido mostrada en la Figura 3.21. Para realizar la interconexión de todos los equipos se adquirieron 50 metros de cable coaxial de altas prestaciones y de impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$.

⁷Es debido al movimiento relativo entre la antena receptora del radiotelescopio y la fuente observada. Cuando la fuente y el receptor se acerquen, la frecuencia que recibiremos de la emisión HI será mayor que 1420.4 MHz (la de reposo) y, cuando fuente y receptor se alejen, la frecuencia recibida será menor que 1420.4 MHz.

Como anécdota comentar que, al ser RAS una empresa ubicada en USA y tener que fabricar y testear alguno de los dispositivos que incluimos en el pedido, los plazos de envío fueron largos, llegando incluso a superar los plazos que indicaban en su web. Por este motivo, para recompensarnos por el retraso sufrido, nos obsequiaron con una bocina diseñada y fabricada por ellos, con polarización lineal y optimizada para trabajar con la línea de HI.

3.4. Testeo de equipos

De poco serviría, por ejemplo, que los LNAs que empleásemos en el radiotelescopio, lejos de amplificar las microondas de 1420 MHz, las atenuasen o, que los filtros de entrada no estuvieran sintonizados a la frecuencia de 1420 MHz sino a otra frecuencia distinta y alejada de ésta. Por este motivo es necesario realizar un testeo de los distintos equipos con el que comprobar que éstos cumplen con las especificaciones requeridas para que, tras el proceso de instalación, todo funcione correctamente.

Poco a poco fuimos recibiendo los equipos que habíamos adquirido. El primer pedido en llegar fue el que hicimos a RF HAMDESIGN, donde venía la antena receptora y el sistema de motores. Al tiempo llegó parte de lo que habíamos adquirido en RAS: el receptor comercial y alguno de los dispositivos de acondicionamiento de señal. Disponíamos prácticamente de todo lo que habíamos adquirido, a falta de algún dispositivo de acondicionamiento de señal, de modo que podíamos comenzar con el testeo de equipos.

El testeo depende del dispositivo: para testear las bocinas, LNAs y filtros se midieron sus parámetros de scattering. Para ello se empleó el analizador de espectros y redes vectoriales Rohde&Schwarz ZVL6, el mismo que se empleó para realizar el análisis de espectro electromagnético en la azotea del edificio I+D+I.

Cuando queremos medir dispositivos de microondas de forma precisa es necesario realizar una calibración del analizador de redes vectorial, así, las mediciones que se obtienen son más veraces. En el GEAT (Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones) de la UPCT se dispone de un kit de calibración para dicho fin. Se trata de una serie de terminaciones cuyos parámetros S son conocidos y se emplean como referencia: se tienen circuitos abiertos, cortocircuitos y cargas adaptadas. El analizador incluye un software de calibración que va solicitando que coloquemos en sus terminales las terminaciones antes mencionadas, así él toma como referencia esos valores conocidos y casi ideales.

Testeo de las bocinas

Tras realizar la calibración del analizador de redes vectoriales se procedió a medir el parámetro S_{11} de las diferentes bocinas de las que disponíamos: tres bocinas de polarización lineal, una de ellas diseñada y fabricada en la ETSIT de la UPCT y la bocina de polarización circular adquirida en RF HAMDESIGN.

Es importante comentar que el parámetro S_{11} que presentará la bocina una vez montada sobre el foco del reflector será distinto que el que presente la bocina individual. Además,

la medida de este parámetro es muy susceptible a las condiciones de medida. La propia manipulación del instrumental hace que los resultados varíen en diferentes mediciones. De este modo, las medidas que se han tomado de estos parámetros se deben contemplar como algo orientativo. La Figura 3.22 ilustra el proceso de medición de las bocinas con el analizador de redes vectorial.



Figura 3.22: Testeo de las bocinas del Radiotelescopio de la UPCT

Para el caso de las bocinas, un dispositivo de microondas formado por un único puerto, sólo se tiene el parámetro S_{11} . El parámetro S_{11} representa la adaptación de la antena, cuando la antena trabaja en recepción este parámetro indica cómo es reflejada la energía de microondas recibida por la antena, no pudiendo ser introducida en el receptor. Para el caso de que la antena se emplee en transmisión este parámetro representa la cantidad de energía que es reflejada hacia el transmisor, no pudiendo ser radiada. En ambos casos interesa que el parámetro S_{11} de una antena sea mínimo a la frecuencia de trabajo.

En nuestro caso, interesa que el parámetro S_{11} de las bocinas sea mínimo a la frecuencia de 1420 MHz, de este modo prácticamente toda la radiación de HI recibida podrá ser introducida en el sistema receptor y muy poca será reflejada. Además, interesa que este parámetro sea grande a otras frecuencias, de modo que se evite la entrada al sistema receptor de otras frecuencias distintas de la de interés.

En la Figura 3.23 puede comprobarse que las tres bocinas presentan un parámetro S_{11} adecuado. En los tres casos a la frecuencia de 1420 MHz el parámetro S_{11} es inferior a -15 dB. En este sentido podemos afirmar que el comportamiento de las bocinas es el esperado y nos permitirá recibir con gran eficiencia la emisión de HI. Por otro lado, aunque no aparezca con claridad en las medidas mostradas, la respuesta de las bocinas es bastante selectiva, pues para frecuencias alejadas de 1420 MHz el parámetro S_{11} es elevado, evitando la entrada al sistema receptor de esas frecuencias.

Testeo de los LNAs

El testeo de los LNA se llevo a cabo midiendo sus parámetros S con el analizador de redes y midiendo su figura de ruido con el medidor de figura de ruido HP 8970B. Según el fabricante estos dispositivos presentan una ganancia de 33 dB y una figura de ruido de 0.34 dB.

Se ha de tener en cuenta que un amplificador es un dispositivo activo que requiere de alimentación externa para su correcto funcionamiento. Con fuentes de alimentación regulables se polarizaron los LNAs adquiridos que requerían una tensión de polarización $V_{POL} = 12V$.

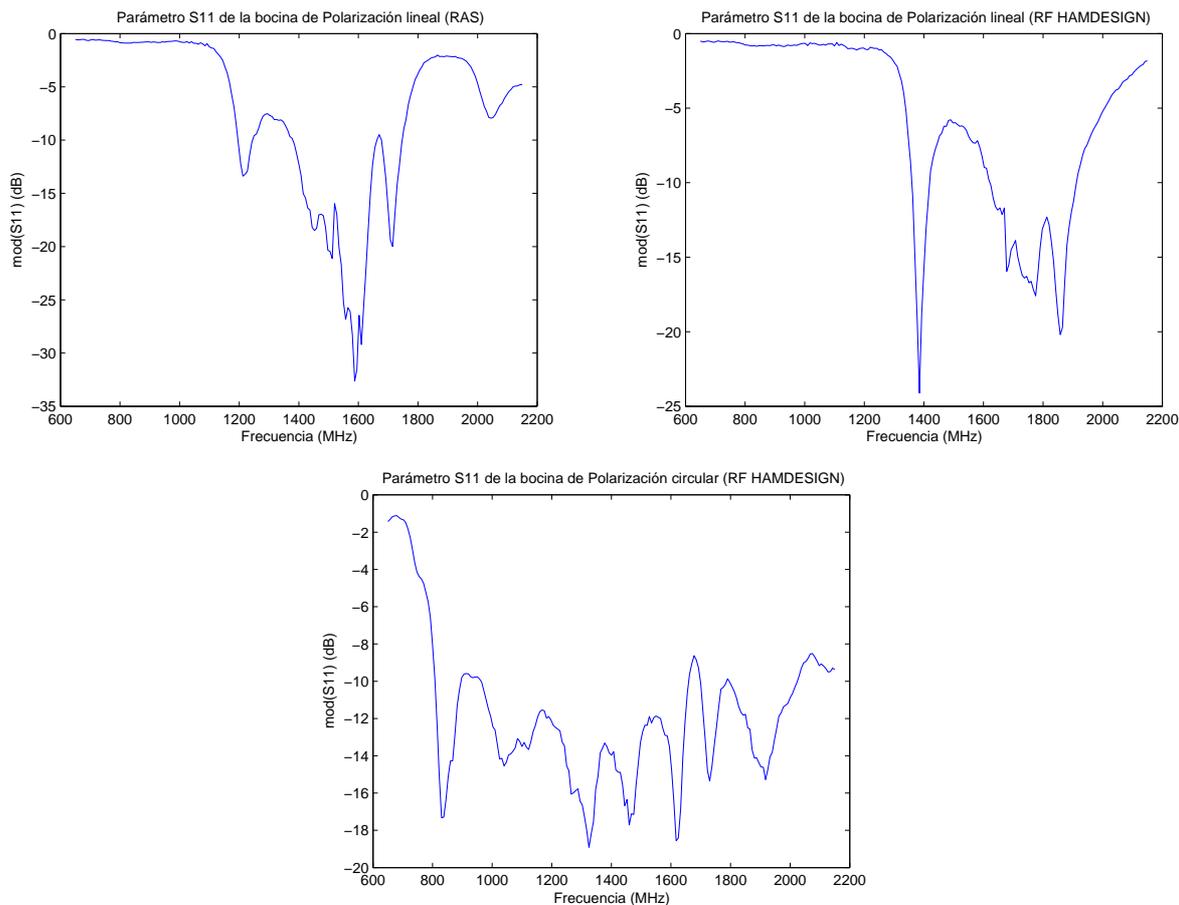


Figura 3.23: Parámetro S_{11} de las bocinas del Radiotelescopio de la UPCT

De nuevo, tras realizar una calibración del analizador de redes vectorial se procedió a la medida de los parámetros S de los LNAs. La Figura 3.24 ilustra el proceso de medición con el analizador de redes.

En este caso, un dispositivo de dos puertos, se tienen cuatro parámetros S : S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} . Definiendo el puerto 1 como puerto de entrada se debe cumplir que S_{11} sea bajo a la frecuencia de trabajo, pues de esta manera casi toda la energía de microondas procedente de la emisión de HI podrá ser amplificada y recibida. El parámetro S_{21} representa la ganancia en transmisión, de modo que interesa que este parámetro sea alto (según el fabricante debe ser de 33 dB).

En general los amplificadores suelen amplificar en un sentido y aislar en el otro, así el parámetro S_{12} será bajo. Por este motivo nuestro sistema receptor, lo que sería el camino de señal, será unidireccional, es decir, se permitirá el paso y se amplificará la emisión de HI recibida por la antena y podrá ser introducida en el receptor, pero no se permitirá el paso de la energía de microondas en el sentido opuesto.

La Figura 3.25 muestra los cuatro parámetros S de un LNA elegido al azar, el resto de amplificadores se sometieron al mismo test, obteniendo resultados similares.

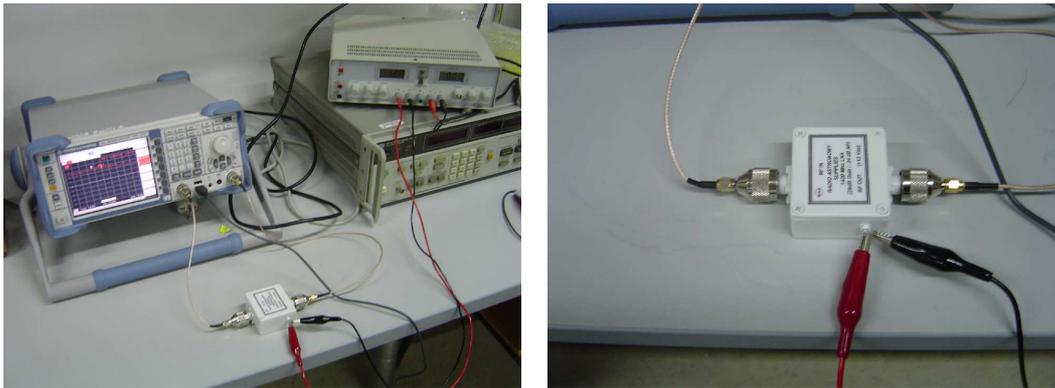


Figura 3.24: Medida de los parámetros S de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT

Otro parámetro importante de los LNAs es su figura de ruido, el GEAT también dispone de un medidor de figura de ruido. Este dispositivo emplea una fuente de ruido conocida, en nuestro caso se empleó la fuente HP 346B. El proceso de medida de la figura de ruido con un analizador de este tipo es sencillo y requiere de los siguientes pasos:

1. Se presiona el botón **PRESET**, situado en el panel de control del equipo de medida de ruido HP 8970B, así se establecen las condiciones iniciales del modo de medida 1.0.
2. Se establece el rango de frecuencias tanto de calibración como de medida (por ejemplo, entre 1000 y 1600 MHz).
3. Se introduce la tabla de los valores de ENR (*Excess Noise Ratio*) de la fuente a emplear en la medida, si ésta todavía no está almacenada.
4. Se calibra el medidor de la figura de ruido, para ello se conecta la fuente de ruido HP 346B directamente a la entrada del analizador y se pulsa dos veces el botón **CALIBRATE** (ver la imagen de la izquierda de la Figura 3.26).
5. Una vez terminado el proceso de calibración, se inserta el dispositivo bajo test entre la fuente de ruido y la entrada del analizador y se presiona el botón **CORRECTED NOISE FIGURE AND GAIN**. Al poco tiempo se muestran los resultados en un display (ver la imagen de la derecha de la Figura 3.26).

Para este LNA se midió una ganancia de inserción a la frecuencia de 1420 MHz de 29.65 dB y una figura de ruido de 0.65 dB. Con el resto de LNAs se obtuvieron resultados similares, pero en ningún caso la figura de ruido medida fue tan baja como la que anunciaba el fabricante.

Puede resultar interesante al lector saber que otra característica de los amplificadores que determina la linealidad de los mismos es el punto de intermodulación de tercer orden (en adelante, IP3). Aunque no se han realizado medidas de este parámetro ya que para nuestra aplicación no representa un factor vital, merece la pena comentar en qué consiste y cómo se realizan.

El método más empleado para medir el IP3 consiste en aplicar a la entrada de nuestro circuito dos tonos sinusoidales de idéntica amplitud y distintas frecuencias, f_1 y f_2 . La

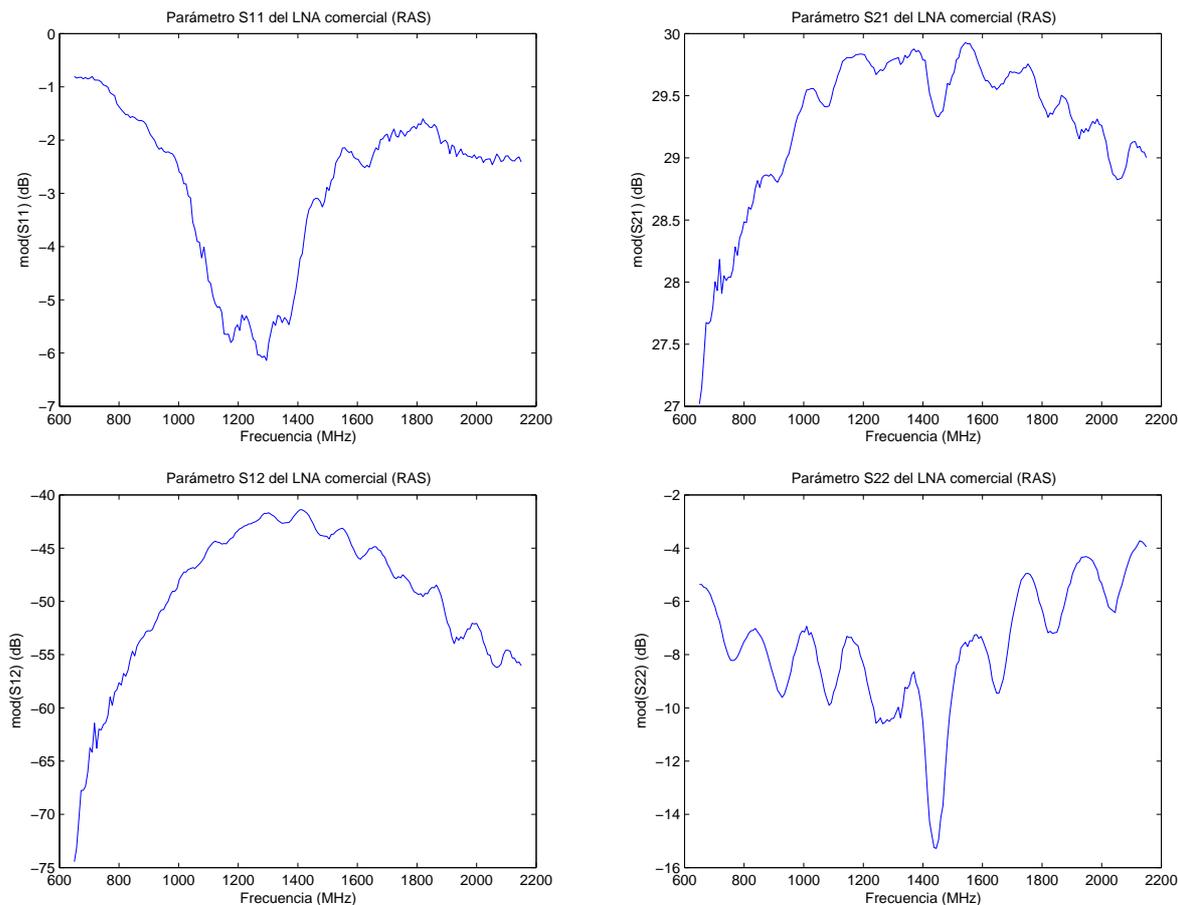


Figura 3.25: Parámetros S de los LNAs del Radiotelescopio de la UPCT

salida de nuestro circuito presentará componentes de intermodulación, no armónicas de las frecuencias introducidas. Mediremos a la salida las potencias de los tonos introducidos, f_1 y f_2 , así como las de los productos de intermodulación de tercer orden, aquellos de frecuencia $2f_2 - f_1$ y $2f_1 - f_2$, por ser los más cercanos al ancho de banda de trabajo del amplificador.

Los productos de tercer orden, al igual que todas las demás señales que aparezcan a la salida, excluyendo los tonos presentes en las frecuencias f_1 y f_2 , constituyen la distorsión del circuito y surgen como consecuencia del comportamiento no lineal del amplificador.

El IP3 representa la potencia de entrada a la cual la potencia de salida del tono fundamental y del producto de intermodulación son iguales. Este dato tiene importancia, por ejemplo, cuando estamos trabajando con anchos de banda limitados ya que la potencia de esos productos de intermodulación puede afectar a la señal de un canal adyacente y degradar la información.

Testeo de los filtros paso-banda

Para testear los filtros paso-banda también se recurre a medir sus parámetros S con el analizador de redes vectoriales. En este caso nos encontramos ante un dispositivo con dos puertos, de este modo se tienen cuatro parámetros S : el parámetro S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} . Debido

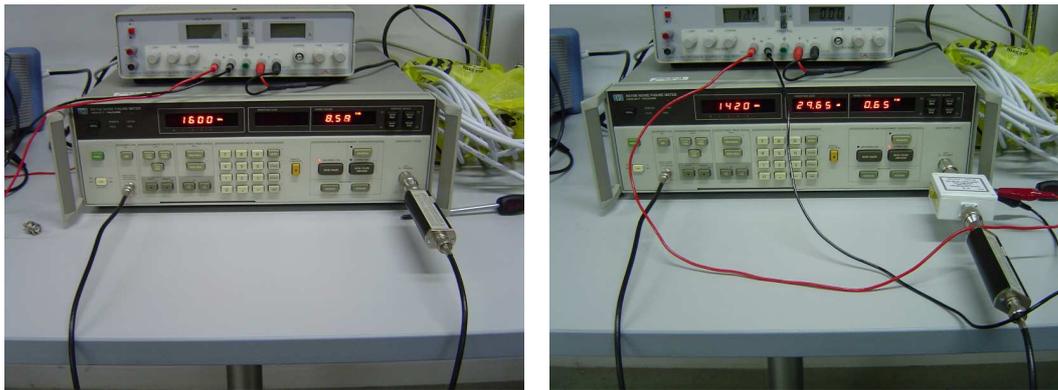


Figura 3.26: Proceso de medida con el medidor de ruido HP 8970B

a que, en general este tipo de dispositivos son simétricos y recíprocos⁸ se tiene que $S_{11} = S_{22}$ y $S_{12} = S_{21}$.

De nuevo el parámetro S_{11} indica la cantidad de energía que será reflejada en el puerto 1 cuando introducimos señal por el puerto 1, de modo que interesa que este parámetro sea mínimo a la frecuencia de 1420 MHz y máximo a otras frecuencias. El parámetro S_{21} es el parámetro de transmisión e indica cómo la energía de microondas que es introducida por el puerto 1 sale por el puerto 2, puesto que interesa la máxima transmisión de potencia a la frecuencia de 1420 MHz este parámetro ha de ser máximo a esa frecuencia.

Un parámetro característico de este tipo de filtros es su ancho de banda a -3 dB (BW_{-3dB}). Este parámetro indica el rango de frecuencias para el cual la atenuación introducida por el filtro es menor que dos veces la atenuación mínima (la que se produce a la frecuencia a la que el filtro está sintonizado). La medida de este parámetro se puede realizar a partir de la función de transferencia del filtro, es decir, de su parámetro S_{21} . Basta con medir las frecuencias para las cuales la atenuación introducida por el filtro es el doble de la mínima atenuación que éste introduce, de este modo se obtienen dos frecuencias, una mayor que la otra, la diferencia entre ambas representa el BW_{-3dB} .

El testeo de los filtros no se pudo realizar, pues la llegada de estos elementos y de la mayoría de la LNAs que habíamos pedido a RAS se retrasó. No obstante, en el capítulo siguiente el lector podrá observar la respuesta característica de un filtro paso-banda sintonizado a la frecuencia de 1420 MHz.

⁸Si un dispositivo es recíproco sus características en transmisión son idénticas independientemente de que empleemos como puerto de entrada un puerto u otro.

Capítulo 4

Instalación del Radiotelescopio

Una vez se dispuso de todos los equipos necesarios se podía comenzar con el montaje e instalación de la antena receptora y el resto de equipos. La idea inicial era que en este capítulo se explicara e ilustrara todo lo que tuvo que ver con la puesta en marcha del radiotelescopio: montaje de la antena receptora, instalación de los motores y resto de equipos, comprobación de que todo funcionara correctamente, realización de las primeras medias de las radiaciones HI, etc. Pero, por causas ajenas a mi voluntad no pude terminar de instalar la antena y el resto de equipos como habría deseado, así que, lo que aquí se expone trata sobre el proceso de montaje de la antena receptora.

Ya se mencionó en el capítulo anterior que la ubicación elegida para la instalación del Radiotelescopio era la azotea del edificio I+D+I. En esta azotea era necesario realizar una serie de obras civiles que permitieran la instalación del Radiotelescopio: fabricación de un mástil¹ para sujetar la antena receptora y los motores, hacer una instalación eléctrica que permitiera alimentar los equipos necesarios, habilitar una sala de control donde serian instalados los PC y resto de equipos, etc. Se debió precisamente al retraso en estas obras el que no pudiera ser todo instalado y testado a tiempo. Aún así, quiero aprovechar estas líneas para hacer pública mi intención de terminar de instalar todos los equipos y dejar en perfecto funcionamiento el Radiotelescopio de la UPCT en el momento en que ésto sea posible.

4.1. Montaje de la antena receptora

Ya se comentaron los motivos por los cuales no podíamos fabricar una antena de gran tamaño en los laboratorios de la UPCT, por lo que se hizo necesario recurrir a empresas externas para adquirir una antena parabólica de 3 m de diámetro. Además, se explicó que adquirir una antena parabólica de este tamaño en España resulta complicado, pues la tradición que aquí se tiene en recepción de satélite es temprana. De modo que se tuvo que recurrir a mercados extranjeros con mayor tradición en la recepción de satélite para adquirir esta antena. Al final se adquirió la antena en RF HAMDESING. Esta antena venia completamente desmontada y empaquetada y, fue tarea de alumnos y profesores realizar el montaje de la

¹Al final del documento se anexa el diseño del mastil del Radiotelescopio.

misma. A continuación, se explica e ilustra el proceso de montaje de la antena parabólica.

4.1.1. Montaje de la estructura del reflector parabólico

Se trata de un reflector parabólico construido en aluminio de 3 m de diámetro y una relación $F/D = 0.4$. La estructura del reflector se encuentra formada por una serie de brazos (12 radios) que parten de una pieza circular situada en el centro del paraboloide. Estos brazos son atornillados a las piezas circulares uno a uno hasta que la estructura presenta un aspecto similar al de una araña gigante (ver Figura 4.2).

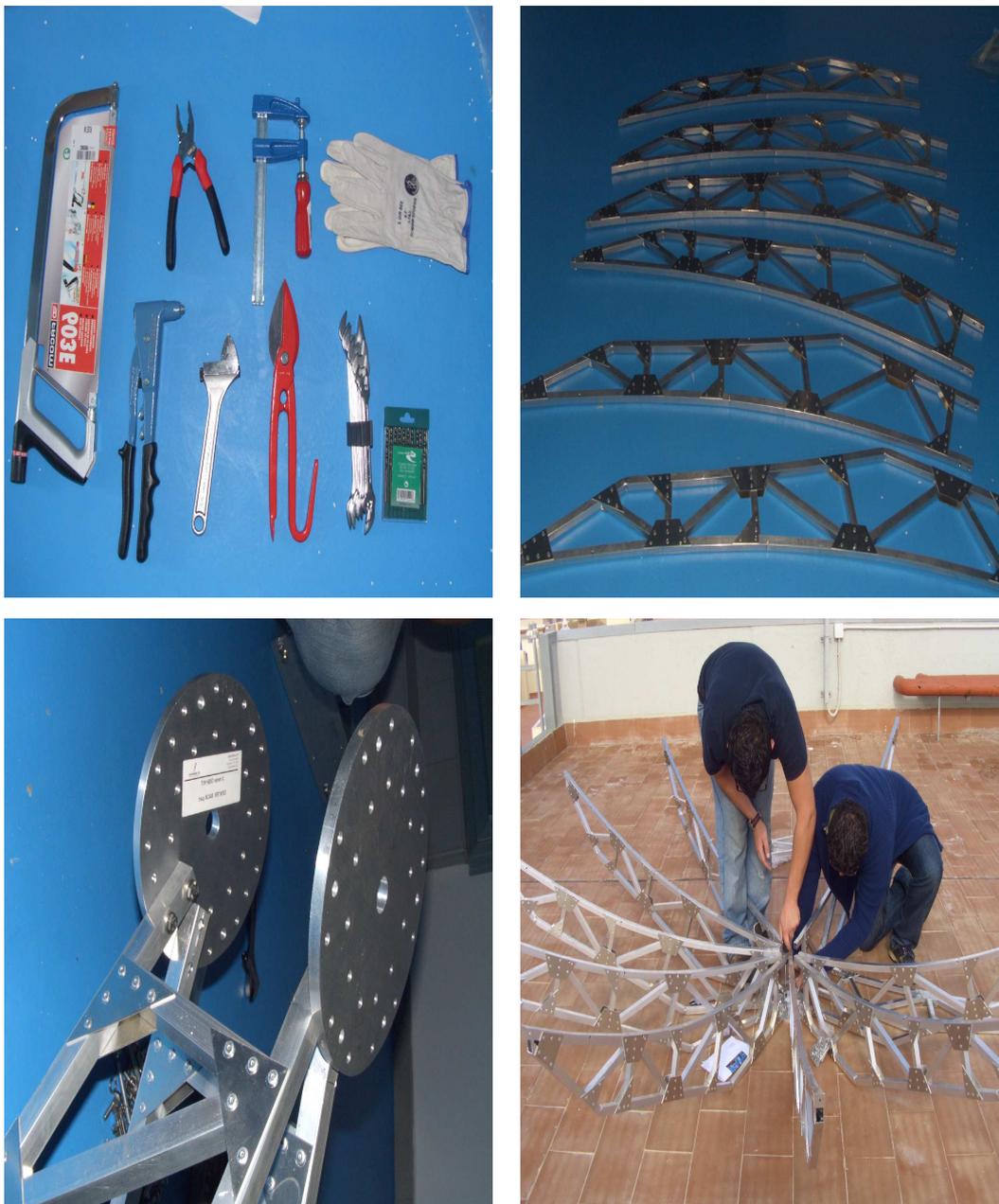


Figura 4.1: Fijación de los brazos de la estructura del reflector parabólico



Figura 4.2: Aspecto de araña gigante de la estructura del reflector

Con el fin de dotar de una mayor robustez a la estructura del reflector parabólico, se insertarán unos aros concéntricos que unian los brazos del reflector (las 12 patas de la araña gigante). Además, estos aros concéntricos resultarían de gran utilidad a la hora de fijar la malla reflectora (ver Figura 4.3).



Figura 4.3: Colocación de anillos concéntricos que unen los brazos de la estructura del reflector

4.1.2. Colocación de la superficie reflectora

Hasta el momento se ha realizado el montaje de la estructura del reflector parabólico, aún resta la colocación de la superficie reflectora donde serán reflejadas las ondas electromagnéticas que incidan sobre ella.

Dependiendo de la frecuencia de las ondas que queramos sean reflejadas en la superficie de nuestro reflector (de su longitud de onda), deberemos emplear un tipo de superficie reflectora u otra. Cuanto mayor sea la frecuencia de las ondas con las que vamos a trabajar,

más “perfecta” ha de ser la superficie reflectora, por ejemplo, en el rango visible (elevadas frecuencias) se emplean espejos pulidos como reflectores. Para frecuencias inferiores (longitudes de onda mayores), por ejemplo, la emisión de HI a 1420 MHz, podemos tomarnos la licencia de emplear superficies reflectoras más irregulares. Incluso para que las ondas de 21 cm sean perfectamente reflejadas en la superficie reflectora no es necesario que ésta sea perfectamente lisa, sino que una malla metálica que disponga de pequeños agujeros puede ser perfectamente empleada como tal.



Figura 4.4: Colocación de la superficie reflectora

En nuestro caso empleamos una malla metálica (como la que se puede emplear para construir jaulas para pájaros) como superficie reflectora. El hecho de que la malla metálica pudiera disponer de pequeños agujeros resulta de gran interés, pues a través de ellos puede

fluir el aire, evitando así que el fuerte viento que sopla en Cartagena cree destrozos en la antena.

Partiendo de un rollo de malla metálica fuimos cortando uno a uno los 12 “quesitos” (sectores circulares) con los que teselar (cubrir) la estructura del reflector, éstos “quesitos” metálicos fueron fijados a la estructura de aluminio mediante remaches. En la Figura 4.4 puede verse ilustrado este proceso.

Merece la pena comentar que el proceso de montaje de la antena receptora en un principio se realizó siguiendo los pasos que el manual de instalación del fabricante indicaba pero, poco a poco fuimos introduciendo modificaciones en este proceso de montaje atendiendo a las inquietudes y aportaciones que iban surgiendo de los alumnos que montamos la antena. Tras colocar los 12 quesitos el aspecto que tenía la antena es el mostrado en la Figura 4.5



Figura 4.5: Aspecto del reflector con la superficie reflectora colocada

El fabricante recomendaba que la malla reflectora excedente (la que quedaba en el perímetro del reflector) fuera cosida a la estructura del reflector empleando alambre pero, aquello no nos parecía la mejor solución dado que, podría entrañar peligro de arañazos y estéticamente dejaba bastante que desear, por estos motivos solicitamos una pletina de

aluminio de unos 20 mm de anchura, un grosor de 0.5 mm y con una longitud tal que permitiera rodear con ella el perímetro del reflector para fijar perfectamente con remaches la malla excedente a la estructura del reflector.

4.1.3. Colocación de la bocina

Recordemos que una antena parabólica se encuentra formada por un reflector parabólico y una fuente primaria o bocina encargada de traducir las ondas electromagnéticas recibidas del espacio en ondas guiadas que, tras ser filtradas y amplificadas serán introducidas en el receptor.

El Radiotelescopio de la UPCT dispone de varias bocinas diferentes: alumnos de la UPCT llevaron a cabo el diseño y fabricación de una bocina con polarización lineal optimizada para trabajar en la banda de 1420 MHz, además se adquirieron dos bocinas comerciales también optimizadas para trabajar en esta banda, una de ellas con polarización lineal (vertical u horizontal, según se oriente el monopolo alimentador con respecto al horizonte) y otra con polarización circular (blanca y a la derecha en la Figura 4.6).



Figura 4.6: Bocinas del Radiotelescopio de la UPCT

La forma de proceder fue la siguiente: Con la antena tendida en el suelo y apuntando al zenit (la araña gigante patas arriba), unimos una pieza circular donde encajan las bocinas comerciales (en rojo en la bocina de la izquierda) a tres perfiles de aluminio de igual longitud. Del centro de la pieza circular colgamos un pequeño peso que, debido a la gravedad colgaba

de forma totalmente vertical. Así, fuimos desplazando el trípode formado (los tres perfiles + la pieza circular) sobre la estructura del reflector hasta lograr que el peso que habíamos colgado se situara sobre el centro del paraboloide (el centro de la pieza circular de aluminio de la que parten los brazos de la estructura), una vez logrado ésto, podíamos estar seguros de que la bocina se encontraba perfectamente colocada en el foco del paraboloide.

Capítulo 5

Diseño y fabricación del receptor-entrenador

5.1. Introducción al receptor-entrenador

Distintos alumnos y profesores de la ETSIT de la UPCT han colaborado con sus diseños a la fabricación de un receptor-entrenador que se empleará como herramienta docente. Con esta herramienta, alumnos y resto de público del Radiotelescopio podrá visualizar y comprender el procesado hardware que sufre la señal de microondas desde que es recibida del espacio por la antena del radiotelescopio, hasta que es digitalizada y mostrada en un ordenador.

Aunque existen muchos tipos de receptores, este receptor-entrenador, en esencia, es similar a los que se emplean en las radios antiguas, en los nuevos terminales móviles o en las comunicaciones de satélite. Las principales diferencias entre estos receptores estriban en las frecuencias de trabajo: las radios antiguas trabajan a frecuencias de varios centenares de KHz, los terminales móviles trabajan a frecuencias entorno a un millar de MHz y las comunicaciones por satélite trabajan a frecuencias de varios GHz.

El trabajar a mayor o menor frecuencia depende de las características de la comunicación: la cantidad de información a transmitir, el medio en el que se establece la comunicación, el tipo de comunicación, si es punto a punto o punto a multiusuario, etc. Lo cierto es que, cuanto mayor son las frecuencias de trabajo, más complejo es el diseño y fabricación de los componentes que forman el receptor.

El receptor-entrenador además de trabajar a 1420 MHz, una frecuencia relativamente elevada, se empleará para recibir señales muy débiles procedentes del espacio, de muy baja potencia. De modo que los dispositivos o subsistemas que lo integran han de ser especialmente sensibles y poco ruidosos. Diferentes alumnos de la ETSIT basaron sus PFCs en el diseño y fabricación de parte de estos dispositivos, habiendo obtenido resultados bastante satisfactorios. De este modo sólo quedaba integrar todos estos subsistemas ya diseñados y fabricados para formar el receptor-entrenador.

Cuando se trabaja con señales de elevada frecuencia es necesario realizar una disminución

de la misma, de ésto se encarga la etapa *Down Converter* de un sistema receptor. Los motivos por los que no interesa trabajar con señales de elevada frecuencia son varios, pero cabe destacar los siguientes:

- Una señal de elevada frecuencia es muy susceptible a sufrir pérdidas en el momento en el que es introducida por un cable u otro tipo de línea de transmisión. Así, resulta complicado transmitir su información sin que se produzca una pérdida o distorsión de la misma.
- El proceso de digitalización de una señal de elevada frecuencia es complejo y requiere de un conversor analógico-digital de elevadas prestaciones, pues se han de tomar muestras de la señal a una tasa muy elevada.¹
- El diseño y fabricación de los dispositivos que trabajan a elevada frecuencia es complejo.

Existen diversas alternativas para implementar una etapa *Down Converter*, pero todas éllas se fundamentan en la misma idea: aprovechar los procesos no lineales que se producen en determinado tipo de dispositivos (no lineales) para obtener réplicas de la información recibida a frecuencias inferiores.

El esquema que sigue el receptor-entrenador es el de un receptor superheterodino (ver Figura 5.1). Con este dispositivos se logra convertir una señal de entrada de frecuencia f_{RF} en un señal que contiene la “misma” información pero con una frecuencia menor. Generalmente a esta frecuencia se le conoce como frecuencia intermedia (IF, *Intermediate Frequency*) y suele corresponder a $f_{IF} = f_{RF} - f_{OL}$. Donde f_{OL} es la frecuencia de una señal sinusoidal lo más monocromática² posible generada en el oscilador y que se mezcla con la señal de RF en un dispositivos no lineal (mezclador). De esta mezcla o heterodinación se producen distintas réplicas que aparecerán a diferentes frecuencias combinaciones lineales de las frecuencias f_{RF} y f_{OL} . De todas esas réplicas sólo nos interesa aquella de menor frecuencia y, es tarea de BPF IF el seleccionarla.

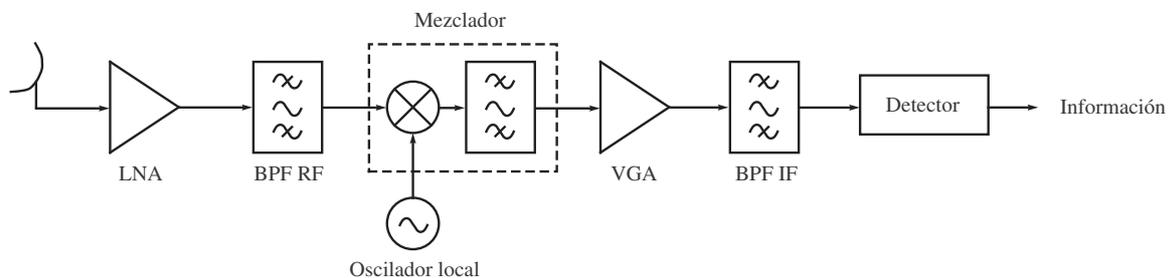


Figura 5.1: Esquema característico de un receptor superheterodino

¹El teorema de Nyquist dice que para digitalizar una señal analógica de frecuencia máxima f_{max} se han de tomar muestras de esta señal a un tasa $f_m \geq 2f_{max}$. De este modo la señal original quedará unívocamente determinada por sus muestras.

²Una señal monocromática es aquella que está formada por una sola frecuencia (su transformada de Fourier es una delta).

En la sección siguiente se hará más hincapié y se estudiarán con mayor detalle las características que han de tener y las funciones que han de realizar los subsistemas o dispositivos que integran el receptor-entrenador.

5.2. Dispositivos que forman el receptor-entrenador

La gran mayoría de los dispositivos que forman el receptor-entrenador ya habían sido diseñados por antiguos alumnos de la ETSIT, que basaron sus PFCs en esta labor, aún así, fue necesario diseñar y fabricar un filtro paso-banda de entrada y un filtro paso-banda con una cero de transmisión en 1296 MHz que aislara la señal de RF de entrada de la señal del oscilador. En esta sección se exponen las características y los principios de funcionamiento de todos los dispositivos que integra el receptor-entrenador.

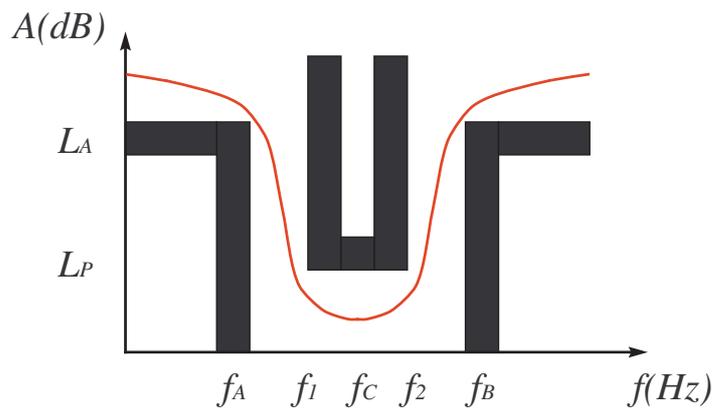
Por supuesto, todos los dispositivos que integran el receptor-entrenador fueron diseñados empleando un mismo sustrato el Duroid-6006 cuyas características pueden verse en la Figura 5.8. Además, en todos los dispositivos se buscaba lograr unas impedancias de entrada y salida de 50Ω para facilitar la adaptación de todo el sistema.

5.2.1. Filtro paso-banda centrado a 1420 MHz

Se requiere un filtro paso-banda de entrada sintonizado a 1420 MHz, cuya finalidad principal es la de dejar pasar las frecuencias de interés, próximas a 1420 MHz y, evitar la entrada al circuito receptor de otras frecuencias. Además, al colocar un filtro de entrada con un ancho de banda determinado, B , se logra limitar la potencia de ruido de entrada en el receptor.

Para el proceso de diseño del filtro se parte de una serie de especificaciones (ver Figura 5.2) que determinarán el comportamiento del filtro. En nuestro caso se requiere que el filtro proporcione la mínima atenuación en una estrecha banda entorno a 1420 MHz (banda de paso), de modo que la mayor parte de la energía de microondas de esas frecuencias se introduzca en el receptor. Del mismo modo, no nos interesa que se introduzcan microondas con otras frecuencias, así, que la atenuación para frecuencias inferiores y superiores a 1420 MHz (bandas atenuadas) ha de ser lo máxima posible.

A partir de estas especificaciones paso-banda se realiza una transformación paso-bajo equivalente y se obtienen, con la ayuda de tablas, los coeficientes del filtro. Dependiendo de las necesidades del diseño, del tipo de rizado requerido, de lo abrupto de las bandas y otros factores, se puede optar por un tipo de filtro u otro. En nuestro caso, se ha optado por emplear un filtro Burtterworth de orden $N = 3$ basado en líneas acopladas. A partir de los coeficientes del filtro se pueden calcular las constantes de inversión y con éstas las impedancias par e impar, Z_0^e y Z_0^o , de las líneas acopladas que conformarán el filtro.



- La frecuencia central (f_c)
- La banda de paso ($f_2 - f_1$)
- Las bandas atenuadas ($f_B - f_A$)
- Las atenuaciones permitidas en estas bandas (L_P y L_A)
- El orden del filtro (N)

Figura 5.2: Especificaciones de un filtro paso-banda

Diseño del filtro empleando MWO

En una primera instancia, el diseño se lleva a cabo empleando MWO, el cual realiza un análisis circuital del filtro. Este tipo de análisis, entre otras cuestiones, no contempla las no linealidades de las líneas de transmisión y ofrece resultados ligeramente diferentes a los reales. Aún así, representa un paso clave en el diseño, pues con rápidas simulaciones se obtienen las longitudes, anchos y separaciones aproximadas de las líneas de transmisión que conforman el filtro.

Se ha empleado el elemento CLIN de MWO que representa dos líneas acopladas, caracterizadas por sus impedancias par e impar, sus longitudes eléctricas y la frecuencia de trabajo.

Puesto que el orden del filtro se fijó en $N = 3$, se requieren $N+1$ pares de líneas acopladas, las cuales tendrán una longitud eléctrica $\varphi = 90^\circ$.

Este filtro se tratará de un red pasiva, simétrica y recíproca, donde $S_{11} = S_{22}$ y $S_{21} = S_{12}$, siempre y cuando $\varphi_1 = \varphi_4$, $\varphi_2 = \varphi_3$ y las líneas presenten las impedancias adecuadas. El esquemático resultante en MWO es el mostrado en la Figura 5.4.

Para comprobar el correcto funcionamiento del filtro, vamos a simular sus parámetros S , de modo que si el diseño ha sido correcto, el parámetro S_{11} ha de ser mínimo en la banda de paso y máximo en las bandas atenuadas. Del mismo modo, se requiere la máxima transmisión de potencia a las frecuencias de interés, de modo que el parámetro S_{21} sea máximo a esas

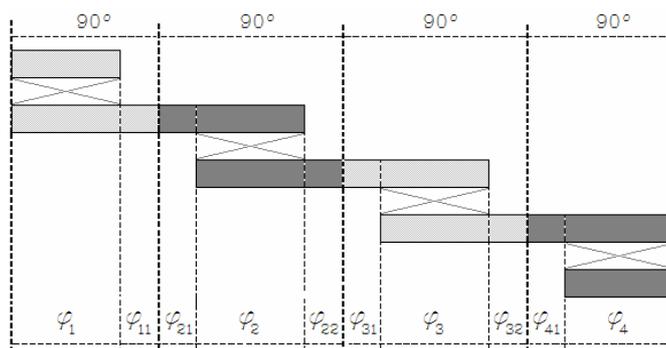


Figura 5.3: Longitudes eléctricas de las líneas acopladas [2]

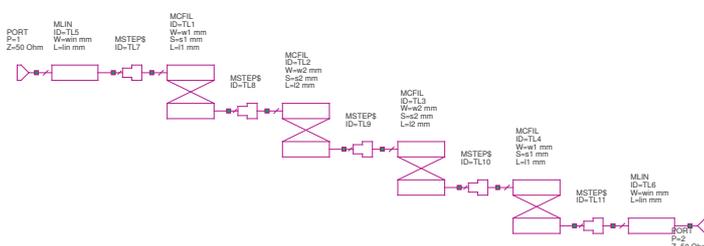


Figura 5.4: Esquemático MWO del filtro con líneas acopladas

frecuencias y mínimo en las bandas atenuadas.

Los resultados de esta simulación se muestran en la Figura 5.5, observar como se cumplen las especificaciones de partida, presentando unas pérdidas de inserción en torno a 0.5 dB.

Como inconveniente, se tiene que este filtro ocupa demasiado espacio y su inclusión en el circuito receptor final sería complicada, así que se opta por transformarlo a filtro Hairpin, que presentará la misma respuesta y un tamaño menor.

La transformación a filtro Hairpin requiere de dos pasos: *creación de las curvas y creación de las entradas tupper*.

Creación de las curvas

Este paso consiste en insertar tramos de línea entre los pares de líneas acopladas (ver Figura 5.6) de forma que se pueda curvar la estructura del filtro. Se debe acortar las longitudes de las líneas acopladas, de modo que las longitudes eléctricas de las mismas sean inferiores a $\varphi = 90^\circ$ y se satisfaga (5.1) para las líneas de entrada y salida y (5.2) para las líneas interiores.

$$\varphi_N + \varphi_{N1} = 90^\circ \quad (5.1)$$

$$\varphi_{N1} + \varphi_N + \varphi_{N2} = 90^\circ \quad (5.2)$$

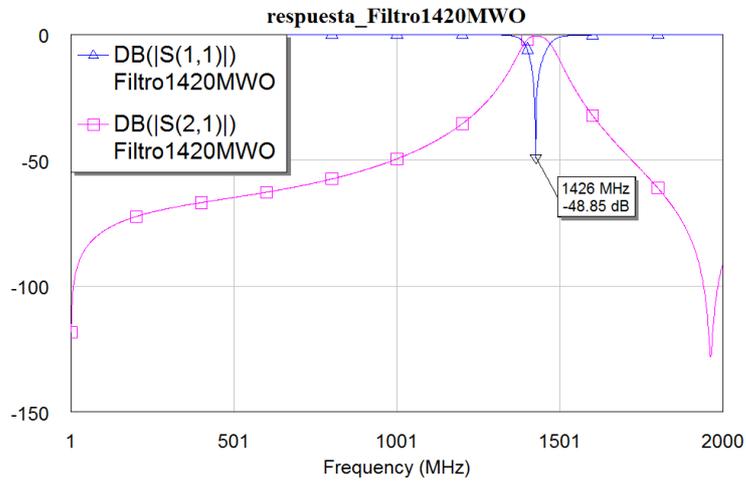


Figura 5.5: Respuesta del filtro de entrada con líneas acopladas

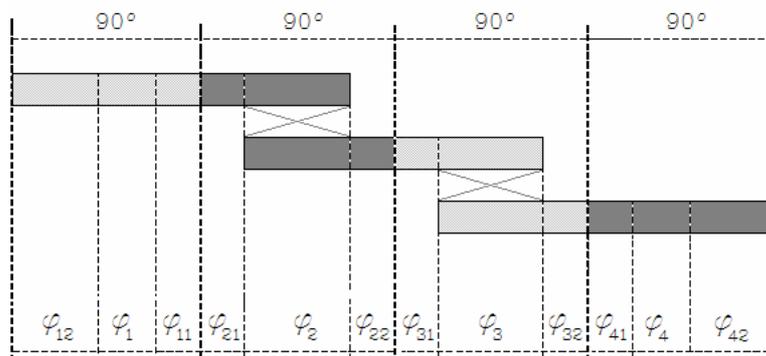


Figura 5.6: Longitudes eléctricas de las líneas acopladas y las curvas [2]

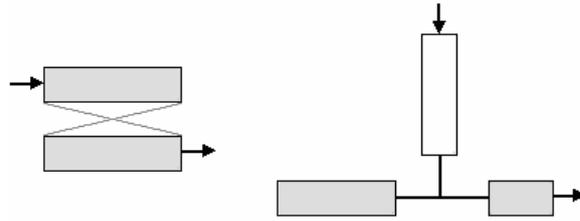


Figura 5.7: Transformación de las líneas acopladas de entrada y salida [2]

MSUB
Er=6.15
H=1.27 mm
T=0.035 mm
Rho=1
Tand=0.003
ErNom=6.15
Name=duroid6006

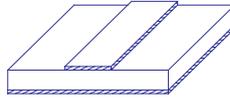


Figura 5.8: Características del sustrato empleado para la fabricación

Creación de las entradas *tapper*

Ahora se tiene que modificar la estructura de las líneas acopladas de entrada y de salida. De nuevo, se debe insertar un tramo de línea tal y como muestra la Figura 5.7. Por supuesto, para lograr la máxima adaptación entre los distintos componentes que forman el receptor-entrenador, las líneas de entrada y salida del filtro han de presentar una impedancia característica $Z_0 = 50\Omega$.

Una vez realizadas las curvas y las entradas *tapper* se realiza una transformación a líneas reales, para lo que se necesitan las características del sustrato. Puesto que este filtro será incluido en el receptor-entrenador, el sustrato empleado es el Duroid RT6006, cuyas características son las mostradas en la Figura 5.8.

Finalmente, se obtiene el esquemático en MWO del filtro Hairpin diseñado y, posteriormente, se simulan sus parámetros S para comprobar que la respuesta del filtro sigue siendo la buscada.

En la Figura 5.10 se puede observar una respuesta espuria, presentando un cero de

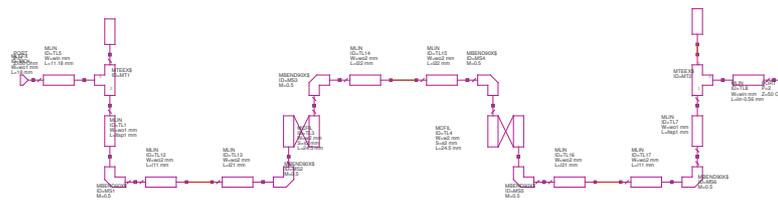


Figura 5.9: Esquemático MWO del filtro Hairpin diseñado

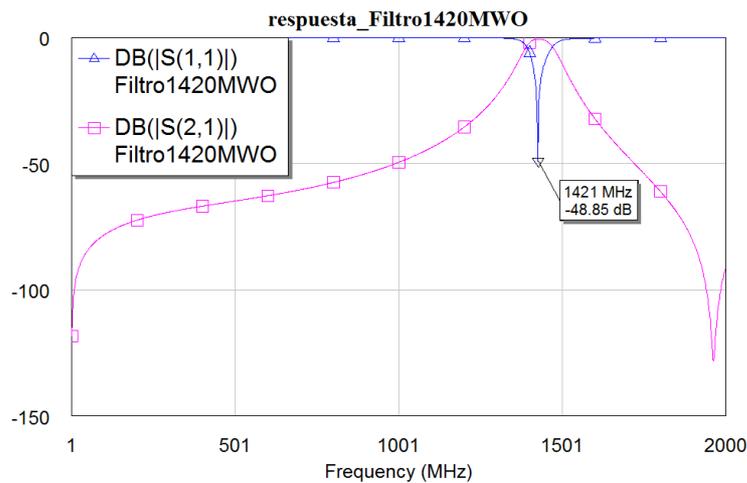


Figura 5.10: Respuesta del filtro Hairpin empleando MWO

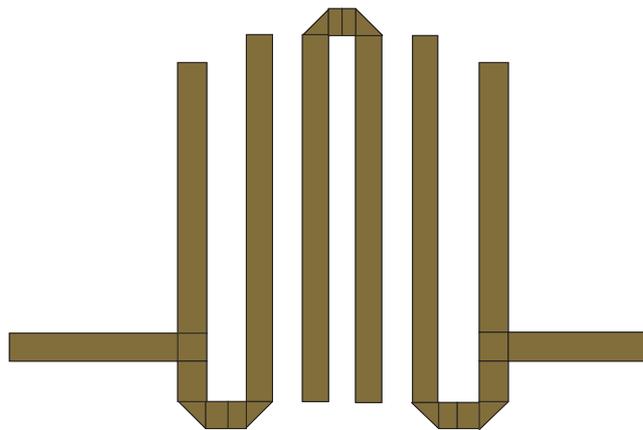


Figura 5.11: Layout del filtro Hairpin de entrada

transmisión entorno a los 1800 MHz. En principio, ésto puede ser beneficioso pues evitaría la aparición de interferencias provenientes de señales de telefonía móvil, GSM1800.

Como se adelantó, MWO realiza una análisis circuital del diseño, el cual suele ofrecer resultados ligeramente diferentes de los reales. Por tanto, aunque la respuesta del filtro diseñado parece la adecuada, debemos realizar un análisis más riguroso del diseño, para así poder asegurar su correcto funcionamiento tras el proceso de fabricación.

MWO nos permite obtener el layout del filtro diseñado, el cual se muestra en la Figura 5.11. Este layout lo introduciremos en ADS (*Advanced Design System*) y realizaremos una simulación electromagnética del diseño.

Diseño del filtro empleando ADS

Una vez se ha ajustado la respuesta del filtro empleando MWO, pasamos a simular la estructura del filtro con ADS, el cual realiza un análisis electromagnético de la misma empleando el método de los momentos. El proceso a seguir consta en los siguientes pasos:

1. **Importar el layout del filtro.** El layout del filtro se definió en MWO como un archivo `.gds`, ahora se debe crear un nuevo proyecto de layout en ADS e importar el archivo que contiene el layout.
2. **Definir las líneas contenidas en el layout como metálicas.** Al cargar el layout nos aparece la estructura del filtro, es necesario definir las líneas que forman el filtro como metálicas, ésto se hace definiéndolas como `cond` que, cuando definamos el sustrato hará referencia a un conductor de cobre.
3. **Definir los puertos de entrada-salida (P1 y P2).** Para realizar el análisis de los parámetros S del filtro es necesario definir los puertos de la red de microondas, en el caso que nos ocupa, únicamente se define P1 como puerto de entrada y P2 como puerto de salida.
4. **Definir el sustrato.** Se deben definir los parámetros del sustrato, en nuestro caso se definen los parámetros del Duroid RT6006, cuyas características son las mostradas en la Figura 5.8.
5. **Definir el mallado donde se resolverá el problema electromagnético.** Es necesario definir el mallado que determinará los puntos de la estructura donde se realizará el análisis electromagnético. Se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:
 - El parámetro `Mesh Frequency` nos indica la frecuencia del mallado, se recomienda fijar este parámetro a dos veces la frecuencia de interés. En nuestro caso se fija en 3 GHz.
 - El parámetro `Mesh Density` es fundamental, pues indica lo tupido que será el mallado. La densidad se mide como `cells/wavelength`, donde esta longitud de onda es determinada por el programa a partir de las características del sustrato y el parámetro `Mesh Frequency`. De modo que si elegimos una densidad del mallado demasiado elevada, el número de puntos donde se realizará el análisis electromagnético será elevado, obteniendo una simulación muy veraz, en detrimento de tener un coste computacional demasiado elevado. Este coste computacional, que se traducirá a un tiempo de simulación elevado, crece de forma cúbica con el número de puntos del mallado. En nuestro caso se definió este parámetro como 25 `cells/wavelength`.
6. **Definir los parámetros de la simulación.** Se trata del último paso antes de comenzar con la simulación, es aquí donde se define el barrido en frecuencia que se quiere realizar. En nuestro caso se ha definido un barrido adaptativo entre 1200 MHz y 1600 MHz. Para el análisis de este tipo de filtro basta con simular sus parámetros S . ADS muestra los resultados en forma de gráficas rectangulares donde se representa el módulo y fase de los parámetros S y diagramas de Smith.

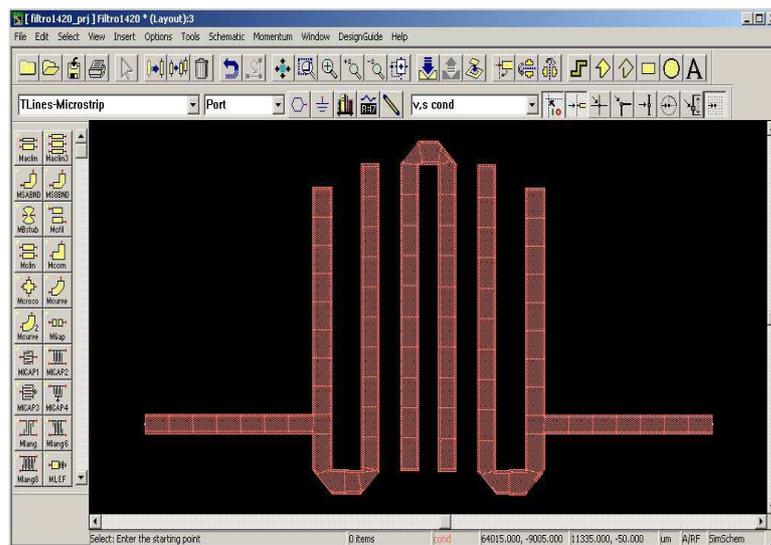


Figura 5.12: Layout del filtro y mallado en ADS

Puesto que, en general, los análisis que se realizan con ADS son tediosos, existe la posibilidad de reutilizar los resultados obtenidos en simulaciones previas, reduciéndose de este modo el tiempo de simulación, ésto se logra activando la opción **Reuse files from the previous simulation**.

Merece la pena elogiar la versatilidad y la potencia de ADS que incluye una herramienta para el diseño de esquemáticos y, perfectamente podría haberse comenzado por el diseño del esquemático del filtro en ADS en lugar de importar el layout generado en otra herramienta de simulación.

La Figura 5.12 muestra el aspecto que presenta el layout del filtro con el mallado.

Tras unos minutos de comenzar la simulación se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 5.13.

Puede comprobarse como los resultados obtenidos son diferentes a los ofrecidos por MWO. El filtro se diseñó para que estuviera sintonizado a 1420 MHz, mientras que ADS nos indica que el filtro está sintonizado a 1500 MHz. También se tienen diferencias en la magnitud de los parámetros S , presentando en este caso unas pérdidas de inserción mayores que las proporcionadas por MWO.

Con el fin de visualizar en una misma gráfica los resultados de ambas simulaciones, se han exportado los datos en ficheros de texto que, tras ser cargados y procesados con Matlab son los que se muestran en la Figura 5.14.

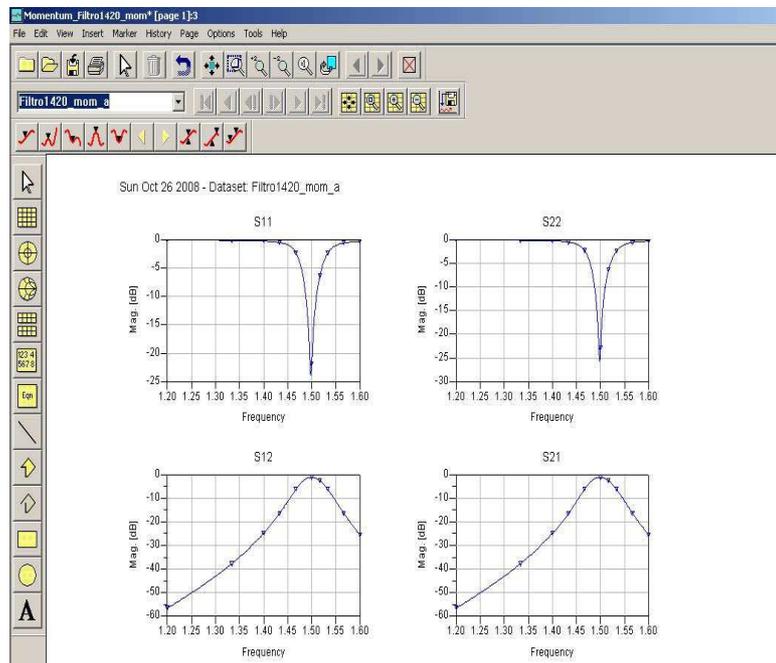


Figura 5.13: Parámetros S del filtro empleando la herramienta *Momentum* de ADS

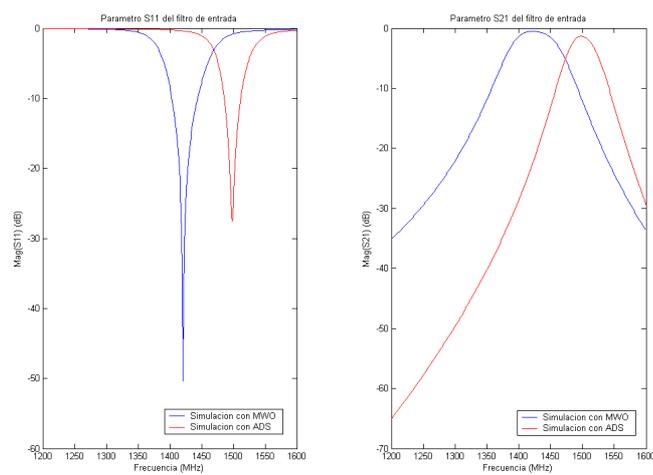


Figura 5.14: Comparación de los resultados obtenidos por MWO y ADS

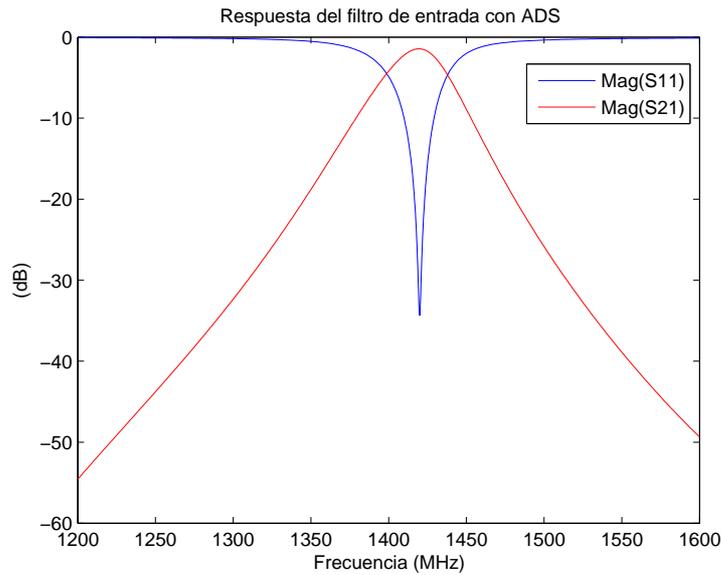


Figura 5.15: Respuesta del filtro Hairpin empleando ADS

Los resultados obtenidos no son los adecuados. El filtro de entrada al receptor debe estar centrado a la frecuencia de 1420 MHz, para poder recibir de forma óptima la radiación de Hidrógeno atómico que se quiere observar. De modo que se debe ajustar el filtro para que presente el comportamiento deseado.

Como se ha mencionado, este tipo de filtro está basado en líneas acopladas de longitud $\lambda/4$. Según los resultados obtenidos, la energía de microondas que mejor se acopla entre los pares de líneas acopladas es la de ondas de frecuencia 1500 MHz.

Puesto que lo que se pretende es que las líneas acopladas presenten una longitud eléctrica de 90° , y se satisfaga³ (5.3) para la frecuencia $f = 1420$ MHz, se deben aumentar las longitudes de las líneas acopladas.

$$\varphi = \beta L = \frac{2\pi}{\lambda} L = \frac{2\pi f}{v_p} L = 90^\circ \quad (5.3)$$

Para MWO el comportamiento deseado se lograba para longitudes de las líneas acopladas $L = 22,3$ mm. Tras aumentar las longitudes de las líneas acopladas hasta tener $L = 24,5$ mm y realizar pequeñas modificaciones en las líneas de entrada y salida del filtro se logra sintonizar el filtro a la frecuencia de interés (ver Figura 5.15).

Según ADS, el filtro diseñado presenta unas pérdidas de inserción $L_p = 1.4$ dB y un ancho de banda $B_{-3dB} = 37$ MHz.

Aunque ADS realiza veraces simulaciones de este tipo de dispositivos, en general, tras el proceso de fabricación la respuesta de éstos varía ligeramente y es más que probable que la respuesta del filtro fabricado a parte de variar en magnitud se desplace ligeramente en fre-

³La ecuación (5.3) no contempla la inclusión de los tramos de línea entre los pares de líneas acopladas que permite la transformación a filtro Hairpin.

cuencia. Ésto se puede deber a varios motivos: por un lado, la microfresadora empleada para la fabricación tiene una precisión limitada y en ocasiones tiene que realizar aproximaciones por exceso o por defecto, por otro lado, las placas microstrip suelen variar ligeramente su ε_r dentro de unas tolerancias que marca el fabricante y es posible que la placa con la que se va a fabricar no presente exactamente las características que se tuvieron en cuenta en las simulaciones.

Fabricación y testeo del filtro

El proceso de fabricación en tecnología microstrip si, en general es complejo, para este tipo de dispositivos que no contienen elementos concentrados se simplifica bastante. Se parte de una placa microstrip virgen, en el mercado existen varios tamaños, para este circuito con una placa de tamaño DIN-A4 es más que suficiente. En esta placa virgen que, recordemos está formada por dos planos metálicos separados por una lámina de dieléctrico, hay que dibujar el layout diseñado en uno de estos planos.

Para dibujar el layout se emplea una fresadora de control numérico. En la UPCT se dispone de la microfresadora LPKF Protomat C60. Esta máquina incorpora distintas herramientas: para realizar un primer “desbaste” se emplean fresas de un grosor considerable, para realizar recortes de precisión se emplean fresas de pequeño diámetro (una decima de milímetro es la máxima precisión que se puede lograr con esta máquina), para hacer *via holes* se pueden emplear brocas de distinto tamaño.

La microfresadora es controlada por un PC a través del programa Board Master, a este programa se le han de pasar una serie de archivos que contienen la información del layout. Para generar estos archivos se ha empleado la herramienta CircuitCam 4.0. A continuación, se explican e ilustran los pasos que se han de seguir para obtener estos archivos.

1. **Importar el layout del filtro.** Necesitamos importar un fichero Gerber que contenga el layout del filtro, se puede hacer con el botón **Import**. El fichero **.ger** se puede obtener desde MWO o ADS, simplemente se exporta el layout del filtro con esta extensión. Al seleccionar el archivo se abre un cuadro de dialogo en el que se puede seleccionar la capa correspondiente. Para este filtro solo necesitamos importar la capa superior (*TopLayer*), la inferior será un plano de masa. Podemos comprobar que se va a importar correctamente el layout fijándonos en las dimensiones **x** e **y**. Al importar se obtiene el layout correspondiente.
2. **Dibujar el layout de la capa inferior.** Se emplean las herramientas de dibujo que hay en la parte izquierda del programa para dibujar el layout de la capa inferior, en este caso se trata únicamente de un plano de masa (rectángulo verde de la Figura 5.17).
3. **Dibujar el contorno de la placa.** Se puede emplear la herramienta **Closed Path** para dibujar el contorno de la placa, después se pincha sobre el botón **Contour Routing** y se nos abre un cuadro de dialogo donde se puede seleccionar que el contorno esté en el interior o el exterior de la línea que hemos marcado, si queremos que la placa sea cortada por el interior o el exterior del borde, y la herramienta que utilizaremos para cortarla. Lo siguiente es marcar en el borde unos puntos en las esquinas que no se

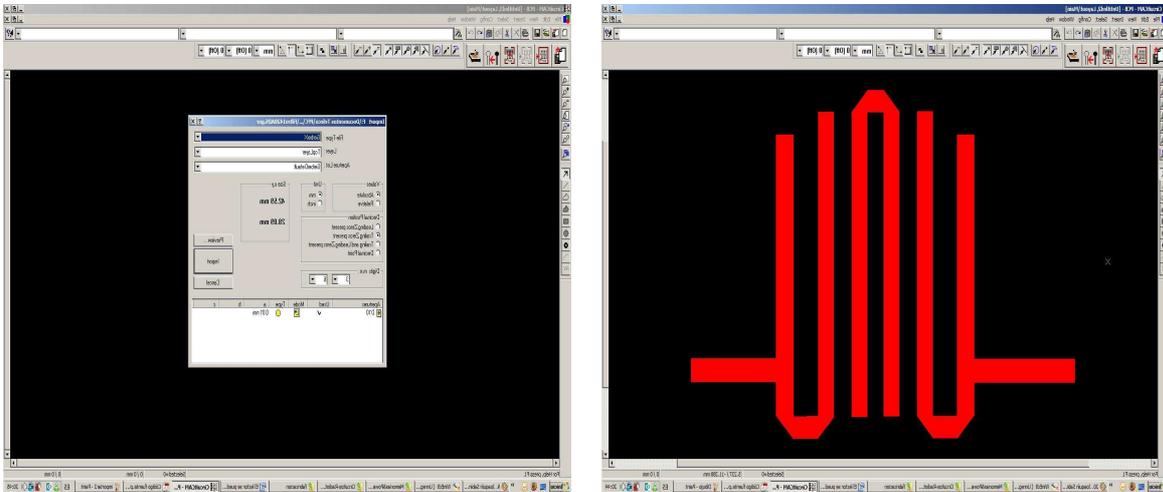


Figura 5.16: Importar el layout del filtro

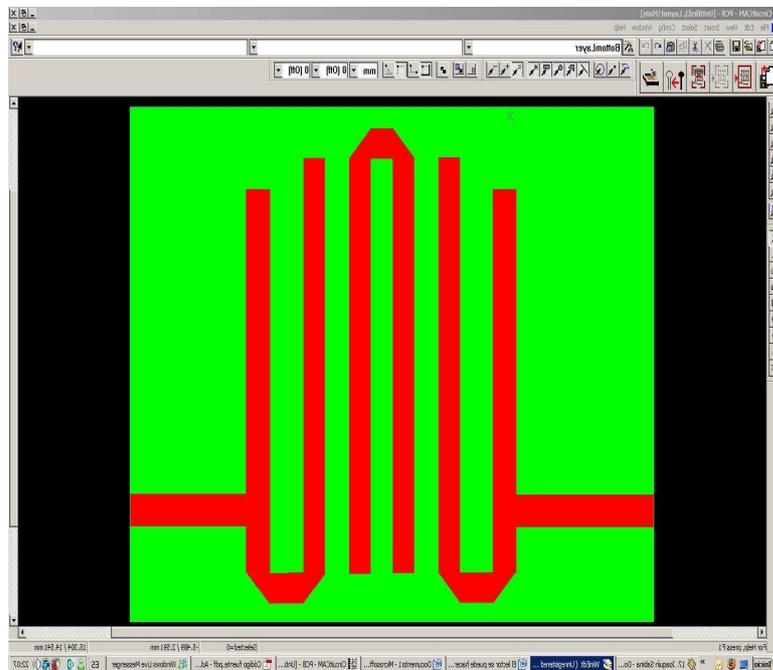


Figura 5.17: Dibujar el layout de la capa inferior

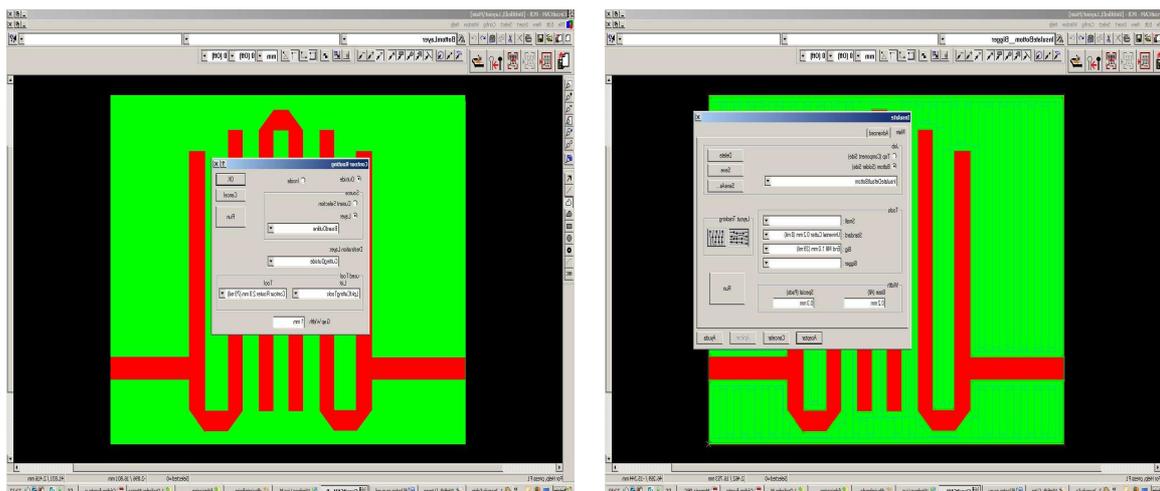


Figura 5.18: Definir las zonas de metal que deben ser eliminadas

cortarán, y que servirán de apoyo a la máquina fresadora para que la placa no se mueva. Para hacer ésto, pinchamos en una esquina y pulsamos el botón Breakout Tab . Repetimos el proceso para el resto de esquinas (dos al menos).

4. **Definir las zonas de metal que deben ser eliminadas.** Para éllo empleamos la herramienta Rubout All Layers y seleccionamos toda la placa. En el menú Edit seleccionamos Insulate y aparece un cuadro de dialogo, en él elegimos la capa superior y la herramienta que vamos a utilizar para realizar el vaciado de cobre. Seleccionamos dos fresas distintas, la primera de éllas de 0.2 mm de diámetro que será utilizada para realizar el contorno de la superficie de cobre, y otra de mayor diámetro que se utilizará para vaciar el resto de cobre de la placa.

Para circuitos más complejos, donde la capa inferior no sea un único plano de masa sino que haya que realizar un dibujo, se debe realizar este proceso con ambas capas.

5. **Exportar los ficheros de control.** Por último se ha de exportar el fichero .lmd de la placa superior, este fichero será interpretado por el software Board Master que controlará a la microfresadora. Para circuitos más complejos se tendrán que importar los ficheros correspondientes a cada placa.

Testeo

Tras el proceso de fabricación es necesario realizar un testeo del filtro, consistente en medir sus parámetros S , para éllo se empleo el analizador de redes vectoriales Rohde&Schwarz ZVL6. Los resultados que se obtuvieron son los mostrados en la Figura 5.19 . Puede comprobarse como la respuesta del filtro se asemeja bastante a la respuesta obtenida con ADS, en este caso el filtro presenta unas pérdidas de inserción entorno a 3 dB, algo superiores a las que daban las simulaciones, pero también se han de tener en cuenta las pérdidas producidas en los conectores.

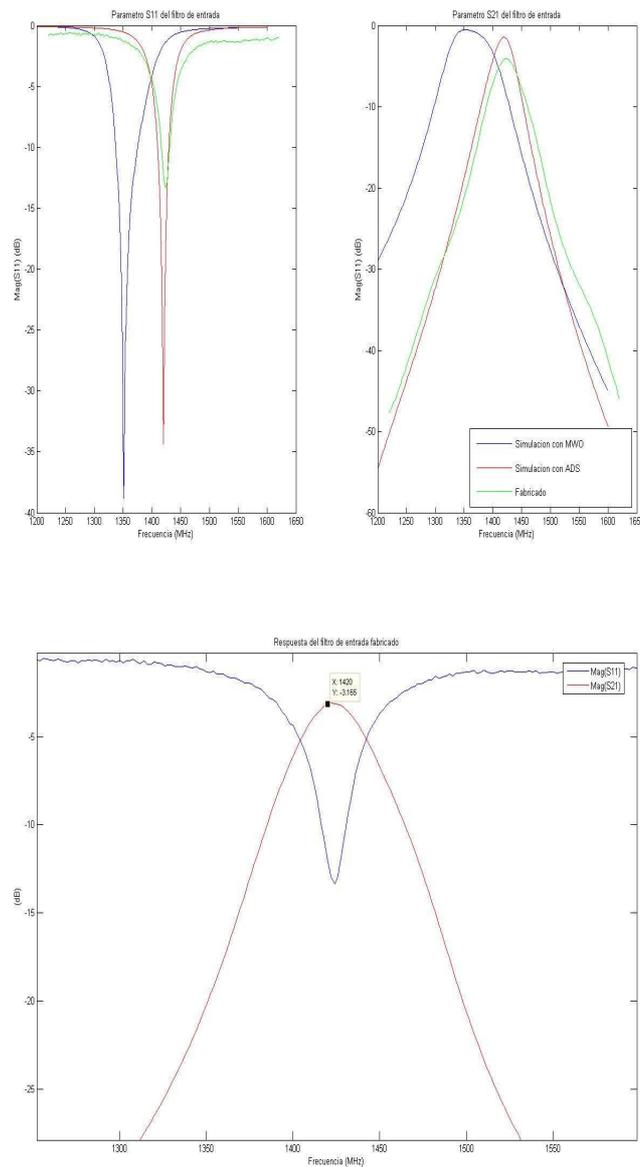


Figura 5.19: Respuesta del filtro fabricado

5.2.2. Amplificadores de bajo ruido

Ya conoce el lector las características de un amplificador de bajo ruido (LNA), y la importancia de colocar estos dispositivos en las primeras etapas de los sistemas receptores. Un amplificador es un dispositivo que incluye un transistor (o varios de ellos) y unas redes de adaptación de entrada y salida, además de las correspondientes redes de polarización de surtidor, base y drenador.

Diferentes alumnos han trabajado en el diseño y fabricación de LNAs para aplicaciones de Radioastronomía, el lector puede recurrir a [7], [8] y [9] para obtener más información acerca de estos dispositivos.

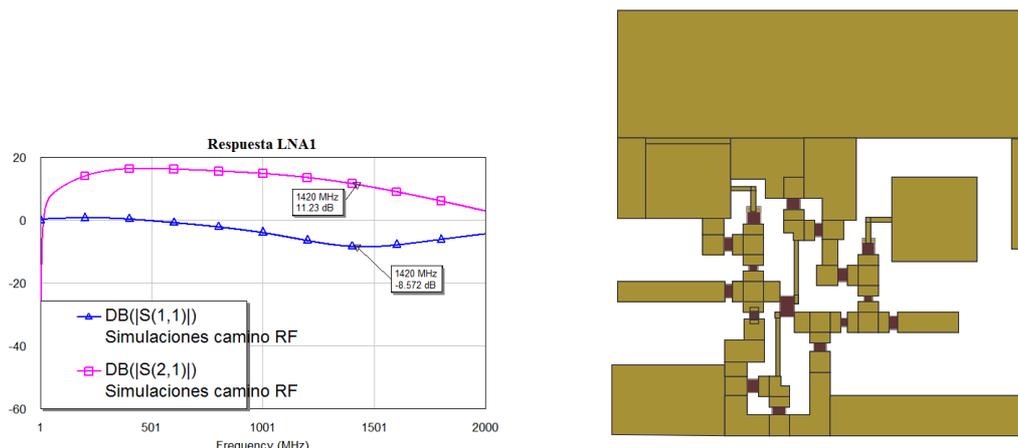


Figura 5.20: Parámetro S_{21} y layout en tecnología microstrip de un LNA del receptor-entrenador [?]

El que un amplificador sea de bajo ruido se debe a que las redes de adaptación de entrada y salida han sido diseñadas para éste fin, atendiendo a los criterios de mínimo ruido. Del mismo modo las redes de entrada y salida pueden diseñarse para lograr la máxima ganancia (máxima transferencia de potencia). Pero para la aplicación que nos ocupa, resulta tan interesante obtener la máxima ganancia como la mínima figura de ruido. Puede recurrirse a [11] para obtener más información acerca del análisis y diseño de este tipo de dispositivos.

El transistor empleado es de tecnología MESFET de Arseniuro de Galio cuyo modelo es ATF-35143 y el punto de polarización seleccionado es el que proporciona el mejor compromiso entre ruido mínimo y máxima ganancia.

En el capítulo 3 se analizaron las prestaciones de los LNAs midiendo sus parámetros S y las figuras de ruido, además se expusieron otras características de este tipo de dispositivos que nos daban una idea del comportamiento no lineal de los mismos.

El receptor-entrenador incluye dos LNAs iguales colocados en cascada, estos dispositivos en las simulaciones presentan una ganancia en torno a los 11 dB y una figura de ruido de 0.85 dB. La respuesta en transmisión y el layout de los LNAs diseñados se muestra en la Figura 5.20.

5.2.3. Oscilador

El oscilador representa un elemento clave en la etapa de bajada en frecuencia (Down Converter) del receptor de microondas que se emplea en un radiotelescopio (y en cualquier otro sistema de telecomunicación que trabaje con elevadas frecuencias). El oscilador es el encargado de generar una señal sinusoidal lo más monocromática posible, es decir, una señal sinusoidal formada por una única frecuencia (f_{OL}) que tenga la forma:

$$V_{OL}(t) = A \cos(2\pi f_{OL}t) \quad (5.4)$$

El lector puede obtener más información sobre el diseño y fabricación de este dispositivo en [2].

El espectro de esta señal, está formado por una delta (una línea espectral) que tiene la forma:

$$V_{OL}(f) = \frac{1}{2}\delta(f - f_{OL}) + \frac{1}{2}\delta(f + f_{OL}) \tag{5.5}$$

Para el caso de un radiotelescopio que estudie la emisión de HI, cuando se combina (se multiplica) la señal del oscilador con la señal recibida por la antena que, tras ser filtrada y amplificada presentará un espectro centrado en $f_{HI} = 1420MHz$, aparecen réplicas de este espectro a frecuencias inferiores ($f_{HI} - f_{OL}$) y a frecuencias superiores ($f_{HI} + f_{OL}$) y otras combinaciones lineales (ver Figura 5.21).

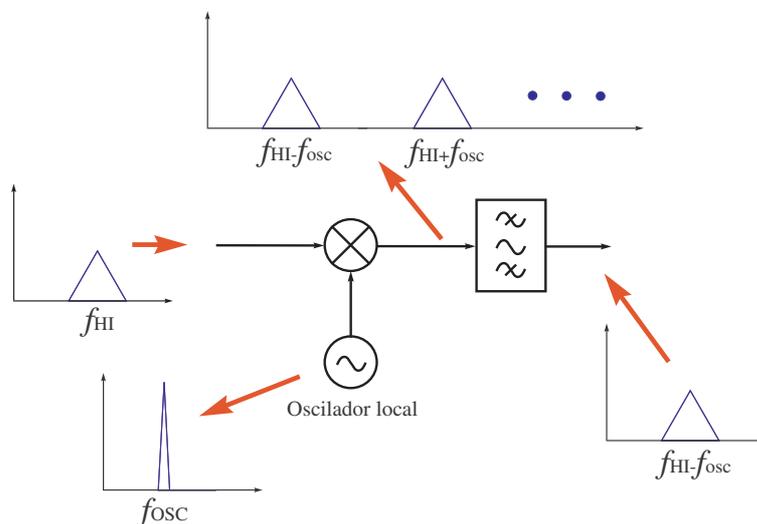


Figura 5.21: Espectros en un proceso de mezclado

De este modo, mediante procesos de filtrado podemos seleccionar la réplica del espectro de menor frecuencia, evitando así los problemas antes expuestos. Además, el resto de dispositivos, puesto que tendrán que trabajar a menor frecuencia, serán de un diseño más sencillo.

La frecuencia del oscilador ha de ser tal que la frecuencia diferencia ($f_{HI} - f_{OL}$) sea baja, es decir, se ha de emplear un oscilador de frecuencia ligeramente inferior (o superior) a la frecuencia de la señal de entrada al mezclador. Para el diseño del receptor de microondas empleado en el Radiotelescopio de la UPCT se ha desarrollado un oscilador capaz de generar una señal sinusoidal de frecuencia 1296 MHz. De éste modo, se obtiene una réplica del espectro de HI a 124 MHz. El diagrama de bloques seguido para el diseño de este oscilador es el mostrado en la Figura 5.22.

Se parte de un señal senoidal monocromática de baja frecuencia (108 MHz) generada por un oscilador de cristal de cuarzo comercial. Esta señal se hace pasar por un generador de armónicos, implementado con un diodo que actúa como rectificador de media onda. Si

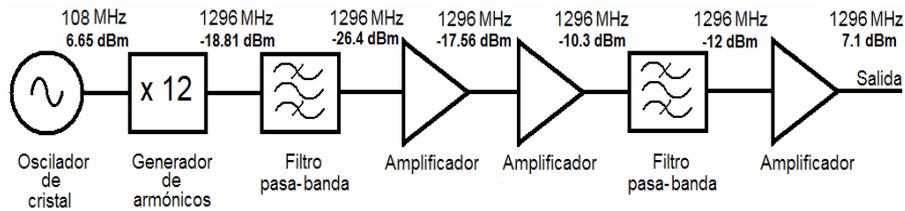


Figura 5.22: Diagrama de bloques del oscilador del receptor-entrenador [2]

representásemos en un osciloscopio la señal de salida del diodo en el tiempo, se tendría una señal sinusoidal recortada, formada únicamente por valores de tensión positivos (o negativos, según se polarice el diodo). Este “recorte” en el tiempo supone que en frecuencia aparezcan múltiples réplicas atenuadas de la señal original (la generada por el cristal de cuarzo), situadas a frecuencias múltiples de 108 MHz (ver la siguiente Figura 5.24).

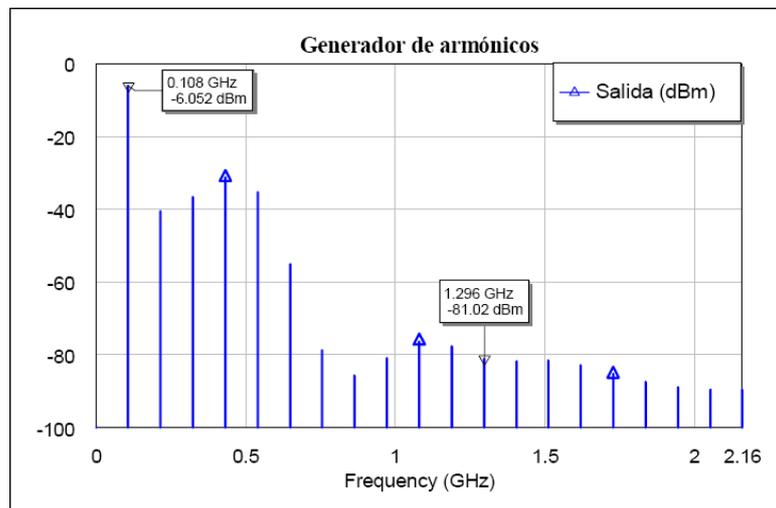


Figura 5.23: Espectro del oscilador tras generador de armónicos [2]

Del espectro anterior interesa quedarnos únicamente con el armónico 12 que tiene una frecuencia $f_{OL} = 1296 MHz$. El resto de bloques del oscilador son los encargados de amplificar y filtrar el espectro anterior para que a la salida del oscilador se tenga una señal sinusoidal lo más monocromática posible y con una potencia adecuada para que se pueda realizar un mezclado satisfactorio.

Como el resto de elementos que forman el receptor de microondas empleado en el Radiotelescopio de la UPCT, el oscilador fue implementado en tecnología microstrip, empleando para ello distintas herramientas CAD de diseño electrónico y electromagnético. Para que el lector se pueda hacer una idea de la complejidad de este sistema se muestra el esquemático MWO y el layout final de este dispositivo.

Tras el proceso de fabricación del oscilador se obtiene el circuito de microondas mostrado en la Figura ???. Para comprobar el correcto funcionamiento del oscilador se realizaron una serie de medidas del espectro en los distintos puntos del diagrama de bloques. El espectro de salida obtenido, que será el que se introduzca en el mezclador, se muestra en la Figura 5.25.

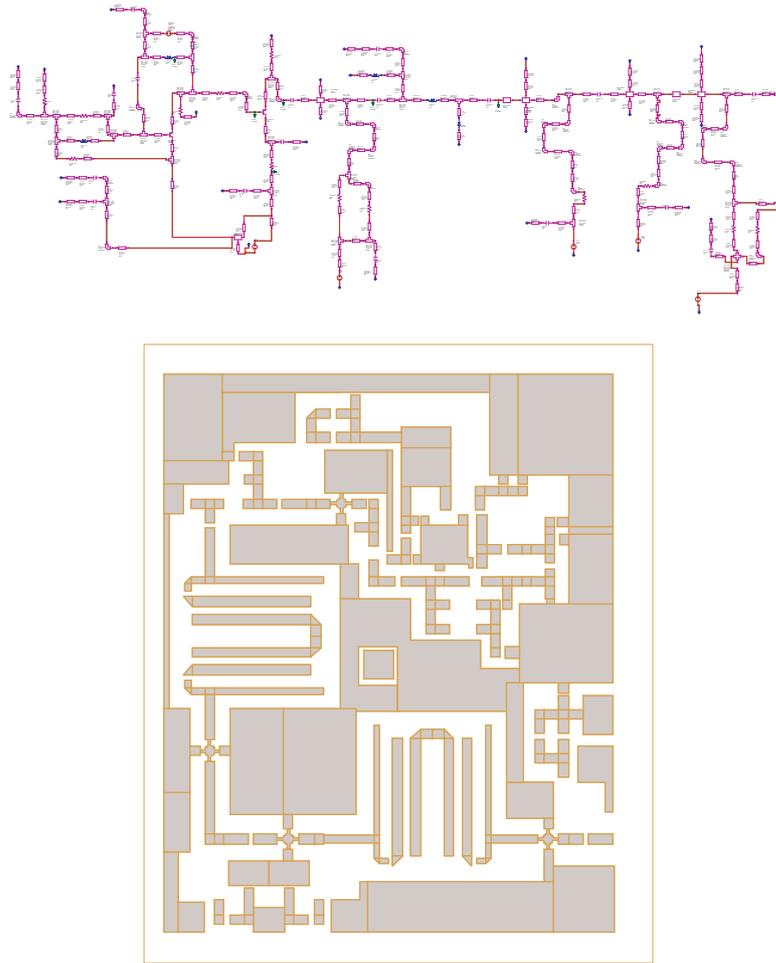


Figura 5.24: Esquemático y layout del oscilador del receptor-entrenador [2]

Se puede observar como se trata de una señal senoidal bastante monocromática, donde los armónicos cercanos, los más perjudiciales, presentan mucha menor potencia que el armónico principal a 1296 MHz.

5.2.4. Mezclador

Se trata de otro dispositivo clave en la etapa Down Converter de todo receptor. Su función es la de mezclar (heterodinar) la señal de RF y la señal del oscilador local para lograr así réplicas del espectro de la señal de entrada a diferentes frecuencias. El lector ya puede imaginar que un mezclador será un dispositivo de tres puertos, dos de entrada y uno de salida.

Varios alumnos de la ETSIT basaron sus PFCs en el diseño y fabricación de distintos mezcladores, el lector puede acudir a [3] y [4] para obtener más información acerca del diseño y fabricación de estos dispositivos.

Un mezclador está compuesto por distintos elementos, cada uno de los cuales encargado de realizar una labor determinada. En primer lugar se debe conseguir la combinación (la suma)

de las dos señales a heterodinar, para éllo se emplea un híbrido *branchline*. Se trata de un dispositivo de microondas simétrico y recíproco⁴ de cuatro puertos cuyo funcionamiento es el siguiente (ver Figura 5.26).

Para aquellas microondas cuya longitud de onda es cuatro veces la longitud de las líneas que forman el híbrido, es decir, para aquellas para las que las longitudes físicas de las líneas suponen longitudes eléctricas de 90° , cuando las introducimos por el puerto 1, la mitad de la energía inyectada saldrá por el puerto 2 y la otra mitad por el puerto 4, estando aislado el puerto 3. Lo mismo ocurre cuando introducimos las microondas por el puerto 3, la energía se reparte por igual entre los puertos 2 y 4, permaneciendo aislado el puerto 1. De este modo, en los puertos 2 y 4 tendremos una combinación (semisuma en cuadratura) de las señales que introducimos por los puertos 1 y 3.

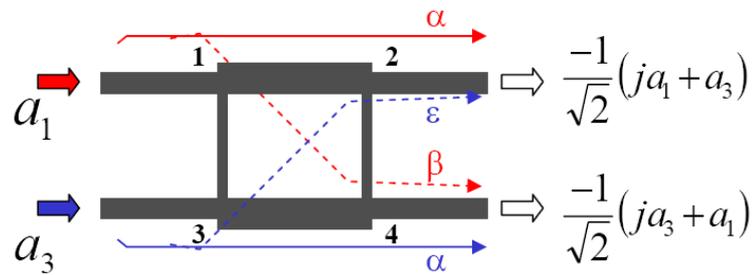


Figura 5.26: Híbrido branchline empleado como combinador [11]

Por tanto, si introducimos la señal de RF (V_{RF}) por el puerto 1 y la señal del oscilador V_{OL} por el puerto 3, en los puertos 2 y 4 obtendremos la combinación buscada de estas señales.

Lo que se pretende es multiplicar las señales de RF y la señal de OL, para éllo se emplean diodos de ley cuadrática, que ante una entrada $V(t)$ tiene una respuesta:

$$I(t) = a_o + a_1V(t) + a_2V(t)^2 + \dots \quad (5.6)$$

Así, quedándonos con el término de segundo orden, desarrollando el cuadrado y puesto que $V(t)$ corresponde a la combinación de la señal de RF y de OL logramos la multiplicación deseada.

Evidentemente a la salida de este dispositivo tendremos multitud de términos (réplicas modificadas del espectro de entrada (ver Figura 5.27), de los cuales sólo nos interesa aquel que corresponde a la frecuencia diferencia (ver Figura 5.21). Será tarea de filtro paso-banda que sigue al mezclador seleccionar la réplica deseada. El diseño y fabricación de este filtro por trabajar a menor frecuencia será más sencillo y podrá implementarse sin dificultad empleando elementos concentrados.

⁴En realidad se trata de un dispositivo recíproco dos a dos, es decir, lo mismo da emplear como entradas los puertos 1 y 3 que 2 y 4.

El layout del mezclador completo se muestra en la Figura 5.28 , en él puede verse de izquierda a derecha: un híbrido branchline (combinador), un diodo (multiplicador) y un filtro paso-banda sintonizado a la frecuencia $f_{IF} = f_{HI} - f_{OL} = 124$ MHz. Además, para mejorar el aislamiento entre los puertos RF y OL y la salida del mezclador se han incorporado dos stub, uno de ellos sintonizado a la frecuencia de 1420 MHz y otro a 1296 MHz.

Más adelante, en la sección de simulaciones se hará patente la necesidad incorporar al diseño un dispositivo que aisle la entrada de RF de la entrada del oscilador (ver subsección 5.2.5).

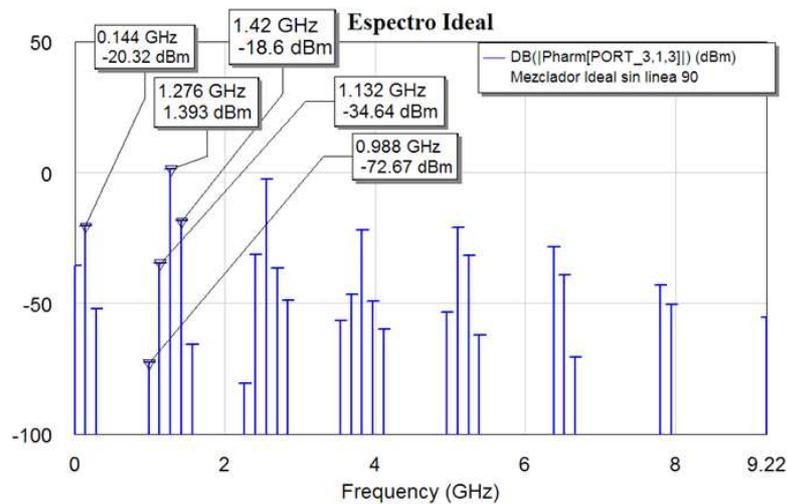


Figura 5.27: Salida del mezclador para una simulación ideal [?]

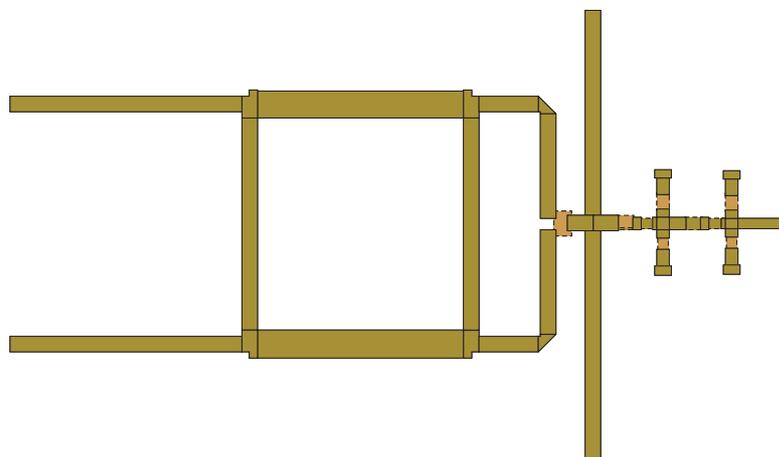


Figura 5.28: Layout del mezclador del receptor-entrenador [?]

5.2.5. Filtro paso-banda centrado a 1420 MHz con cero de transmisión en 1296 MHz

Se trata de un filtro paso-banda sintonizado a la frecuencia de 1420 MHz que además presenta un cero de transmisión a la frecuencia de 1296 MHz. De este modo y puesto que se trata de un dispositivo simétrico y recíproco se permite el paso sin apenas atenuar de la señal de RF y se impide el paso de la señal de OL.

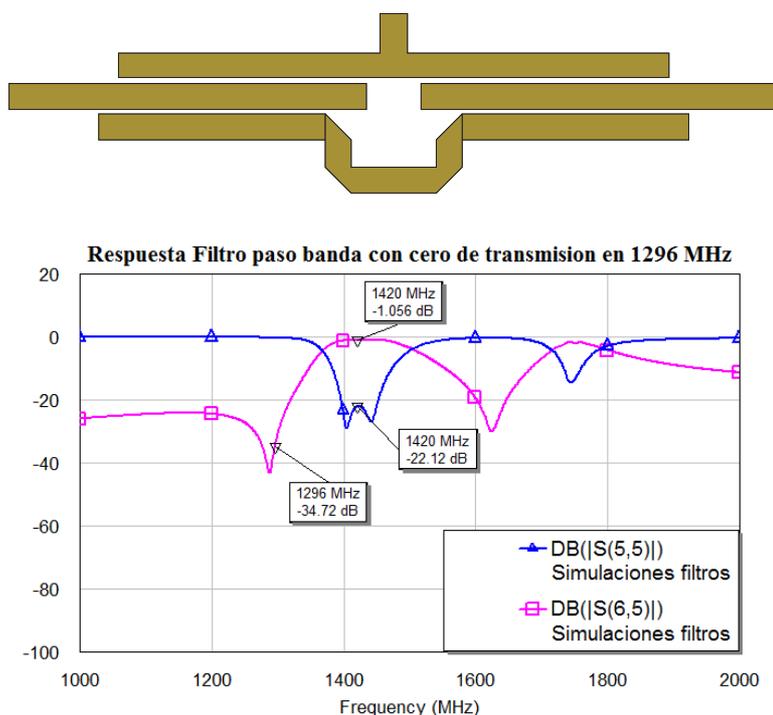


Figura 5.29: Layout y respuesta en frecuencia del filtro paso-banda sintonizado a 1420 MHz con cero de transmisión en 1296 MHz

Este tipo de filtro ha sido diseñado por un profesor de la ETSIT [14] que ha basado su tesis doctoral en el desarrollo de nuevas técnicas de diseño de este tipo de filtros. No vamos a entrar en el estudio riguroso y complejo de este tipo de filtro, pero sí merece la pena comentar que basa su funcionamiento en la interferencia destructiva que se producen en las microondas de 1296 MHz cuando se combinan en contrafase tras haber recorrido caminos eléctricos diferentes (el camino superior curvado y el camino inferior).

La Figura 5.29 muestra el layout y la respuesta en frecuencia de este tipo de filtro, se puede comprobar cómo se logra el cometido buscando: apenas atenuar las microondas de 1420 MHz y atenuar fuertemente las microondas de 1296 MHz.

5.3. Simulaciones del receptor-entrenador

Para el diseño del receptor-entrenador se empleó MWO 2007. Esta herramienta permite incluir subcircuitos y realizar simulaciones circuitales a nivel de sistema. Ya se mencionó anteriormente que este tipo de simulaciones difieren en la mayoría de los casos del comportamiento real, aún así, representan un paso clave en el proceso de diseño, pues con rápidas simulaciones se obtienen resultados aceptables.

El diseño del receptor-entrenador comenzó con la simulación individual de los distintos subsistemas que lo integran para, una vez comprobado su correcto funcionamiento comenzar a realizar simulaciones a nivel de sistema. Aquí pudimos comprobar la importancia que tiene el correcto diseño de los subsistemas individuales y lo importante que es que los dispositivos presenten impedancias de entrada y salida de 50Ω para que luego todo esté adaptado y no se produzcan reflexiones indeseadas que actúen en detrimento de la calidad del sistema.

En la introducción al receptor-entrenador se comentó que éste seguiría el esquema de un receptor superheterodino. Por un lado se tenía la entrada de RF (en adelante, cadena de RF) que estaba formada por LNAs y filtros paso-banda, esta cadena de RF conectaba con un puerto de entrada del mezclador y, en el otro puerto de entrada del mezclador se conectaba la salida del oscilador.

5.3.1. Simulaciones de la cadena de RF

Las primeras simulaciones en realizarse se hicieron para comprobar cuál era la mejor disposición de los dispositivos de la cadena de RF. Según la fórmula de Friis vimos que para obtener un receptor con la máxima ganancia y con la mínima figura de ruido, los primeros dispositivos debían ser aquellos que presentarían las mayores ganancias y las menores figuras de ruido.

Otra cuestión a tener en cuenta es que para el correcto funcionamiento del mezclador (del receptor en general) se debían garantizar unos determinados niveles de señal en sus puertos de entrada, en concreto, en el puerto RF se debía garantizar un nivel de señal (potencia) de -10 dBm y en el puerto OL se debían garantizar 10 dBm. El garantizar los -10dBm en el puerto RF siempre se podía llevar a cabo empleando más LNAs comerciales antes del receptor, de hecho, esto será algo a tener muy en cuenta en la fase de instalación del radiotelescopio.

Para la elección de la cadena de RF óptima se realizaron simulaciones de los parámetros S de las distintas alternativas: BPF-LNA-LNA, LNA-BPF-LNA y LNA-LNA-BPF. Para ello se creó un esquemático como el mostrado en la Figura 5.30 y se simuló los parámetros de reflexión y de transmisión obteniendo los resultados que muestra la Figuras 5.31, así como los parámetros S_{12} .

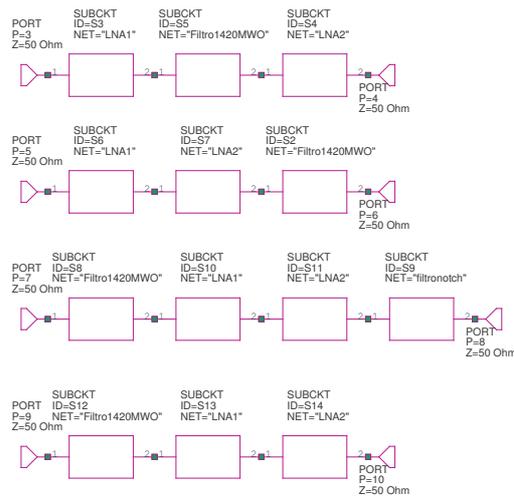


Figura 5.30: Esquemático MWO con las diferentes alternativas para la cadena de RF

Se puede comprobar cómo las tres alternativas presentan prácticamente la misma ganancia en transmisión, en torno a 21 dB para la frecuencia de 1420 MHz. Estos 21 dB se pueden obtener de sumar los parámetros S_{21} en dB de los dos LNAs y restar las pérdidas de inserción del filtro paso-banda, algo parecido es lo que hace MWO. En este sentido, ya sabemos cuál es la ganancia que introduce nuestra cadena de RF a la señal de HI que coloquemos a su entrada y, por tanto, el nivel de señal que debemos garantizar a la entrada del receptor-entrenador para que a la entrada del mezclador se tengan los -10 dBm que se requieren.

La cuestión que va a determinar la mejor alternativa de cadena de RF es el parámetro de reflexión S_{11} , en este caso se puede comprobar que las distintas alternativas presentan diferentes parámetros S_{11} . Interesa que S_{11} sea lo más bajo posible a la frecuencia de 1420 MHz, pues esto nos indicará que la energía de microondas procedente de la emisión de HI que introduzcamos en el receptor apenas será reflejada, pudiendo recibir de forma eficiente esta radiación.

De las tres alternativas, la que mejor resultado da según MWO es la de colocar primero un BPF seguido de dos LNAs. Estos resultados tienen su sentido, pues el filtro paso-banda fue diseñado para presentar un S_{11} bajo a la frecuencia de 1420 MHz (permitiendo la transmisión con apenas atenuación de las microondas de 1420 Mhz), mientras que los LNAs, aunque también, no fueron diseñados para garantizar la máxima ganancia, en cuyo caso la impedancia vista a su entrada sería 50 Ω y el S_{11} también sería bajo. Además, debido a que la adaptación que estos dispositivos presentan no es perfecta se producen reflexiones que hacen inestable la respuesta en reflexión de las otras dos cadenas alternativas.

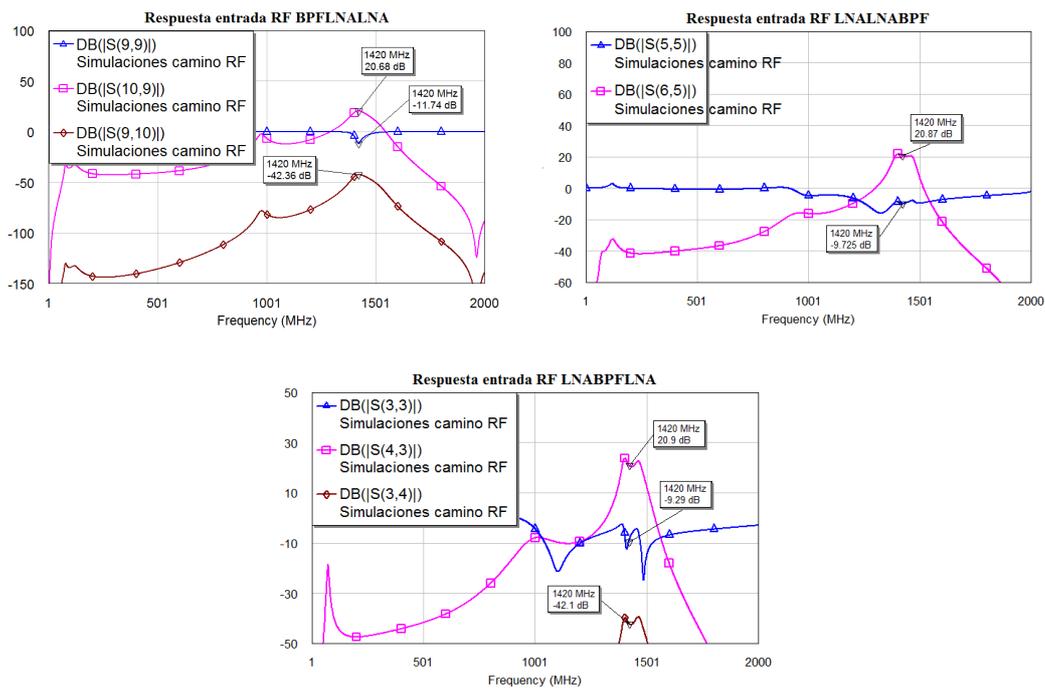


Figura 5.31: Resultados de las simulaciones de las distintas alternativas de cadena de RF

Por otro lado, el colocar el filtro de entrada con un ancho de banda determinado B limita la potencia de ruido de entrada al mezclador, pues la amplificación que los LNAs introduzcan se realizará en un ancho de banda limitado. Esta misma alternativa es la que emplean los transceptores⁵ de satélite: se dispone de un filtro paso-banda sintonizado a la frecuencia de cada canal seguido de un HPA (High Power Amplifier).

Otra cuestión a tener en cuenta es que el parámetro S_{12} de la cadena RF sea bajo a la frecuencia del 1296 MHz, de este modo lograremos aislar la entrada de la potente señal de OL. De hecho, más adelante, cuando analicemos los espectros obtenidos en los diferentes puntos, podremos comprobar cómo no es suficiente con el aislamiento que ahora se tiene y será necesario incluir el filtro paso-banda con cero de transmisión en 1296 para mejorar este aislamiento.

5.3.2. Simulaciones del espectro

Una vez se ha determinado la configuración óptima de la cadena de RF pasamos incluir en nuestras simulaciones el mezclador. Para ello, conectamos la cadena de RF al puerto RF del mezclador y en el puerto OL, introducimos una señal senoidal ideal de 1296 MHz con una potencia de 10 dBm que hará el papel del oscilador. A la entrada de nuestra cadena de RF introducimos también una señal senoidal que intenta simular la línea de HI que queremos recibir, la potencia de esta señal de entrada ha de ser tal que, teniendo en cuenta la ganancia de la cadena de RF se garanticen los -10 dBm, por tanto, realizamos la simulaciones

⁵Un transceptor es un dispositivo capaz de transmitir y recibir. En comunicaciones por satélite se integran en los satélites y actúan como repetidores de señal.

empleando una señal senoidal con una potencia de -30 dBm aproximadamente. De este modo, según MWO, la sensibilidad del receptor-entrenador será aproximadamente de -30 dBm.

En este caso, se realizaron medidas del espectro electromagnético que se tiene en los diferentes puntos del receptor entrenador. Algo parecido es lo que se pretende hacer finalmente con el receptor-entrenador: emplear un analizador de espectros y una sonda de alta impedancia para poder visualizar y comprender el procesado hardware que sufre la señal de microondas a su paso por los distintos subsistemas que forman el receptor-entrenador.

Para realizar el análisis de espectro, MWO incluye un tipo de simulación que se basa en el balance de armónicos y con la que se mide la potencia de las diferentes rayas espectrales que aparecen a diferentes frecuencias. Lo que interesará es que, en el puerto de salida del mezclador predomine sobre el resto de armónicos el armónico correspondiente a las f_{IF} 124 MHz, que es precisamente el que posteriormente será digitalizado y mostrado en un ordenador.

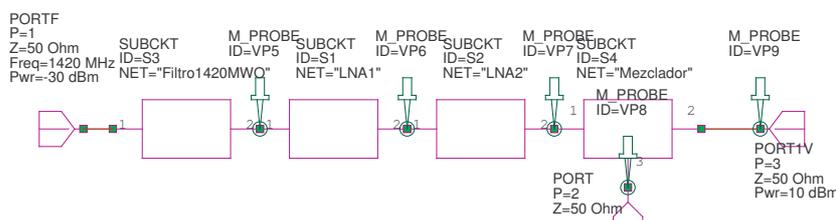


Figura 5.32: Esquemático empleado para realizar las medidas de espectro

El esquemático MWO con el que se realizaron estas simulaciones es el mostrado en la Figura 5.32. Se adelanta que los resultados que en estas simulaciones se obtengan serán meramente orientativos pues se trata de una simulación ideal donde, tanto la señal de OL como la correspondiente a la emisión de HI (señal de RF) han sido implementadas con señales senoidales monocromáticas. Aún así, estas simulaciones nos permitirán comprobar el correcto funcionamiento del mezclador y del resto de dispositivos que integran la cadena de RF.

A continuación se muestran y explican los resultados obtenidos en los distintos “puntos de test” del receptor-entrenador.

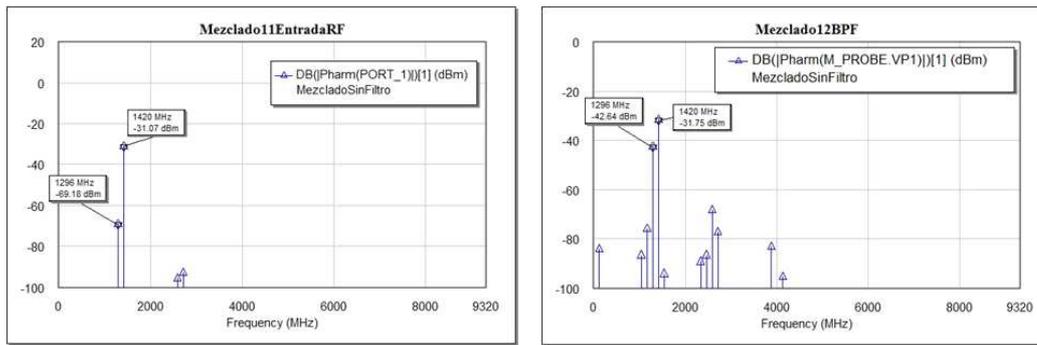


Figura 5.33: Espectros a la entrada del receptor-entrenador y tras el filtro paso-banda (señales RF y OL senoidales puras)

A la entrada del receptor-entrenador aparece el espectro de la señal de entrada (una línea espectral en 1420 MHz) con la potencia que fijamos -30 dBm, además aparece la señal del oscilador con una potencia de -69 dBm, ésto es algo perjudicial y se debe a que la cadena de RF no aísla completamente en sentido inverso.

En la Figura 5.33 el espectro que se obtiene es similar, la señal de entrada es ligeramente atenuada por el filtro, del mismo modo, ahora la potencia de la señal de OL que se observa es ligeramente mayor que la que teníamos a la entrada ya que, en este punto la señal OL aún no ha sufrido la atenuación introducida por el filtro. Se podrá comprobar que, conforme nos acerquemos al mezclador mayor será la potencia de la señal de RF (pues para eso está diseñada la cadena de RF) pero también será mayor la potencia de la señal OL.

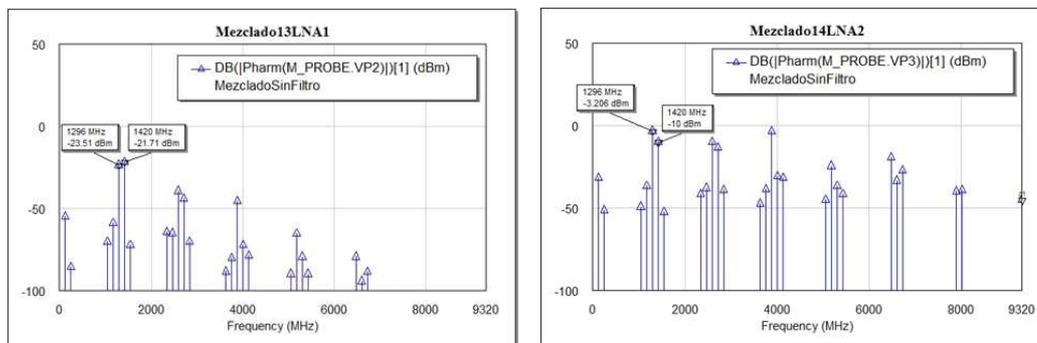


Figura 5.34: Espectros tras el primer LNA y en el puerto RF del mezclador (señales RF y OL senoidales puras)

Puede comprobarse en la Figura 5.34 que la potencia de la señal de OL que se tiene en el punto de test que hay entre los dos LNAs es comparable a la potencia de la señal de RF. En el puerto de entrada al mezclador la potencia de la señal de OL es incluso superior a la potencia de la señal de RF, esto parece desmentir aquello que se anticipó sobre el híbrido branchline, cuando se afirmaba que cuando introducíamos una señal por 1 nada salía por 3. En realidad está falta de aislamiento empeora la calidad del sistema receptor y es por élllo por lo que fue necesario diseñar e incluir en la cadena de RF un filtro paso banda con un cero de transmisión a la frecuencia de 1296 MHz.

Finalmente, la Figura 5.35 muestra el espectro a la salida del mezclador y se puede comprobar cómo efectivamente, el espectro buscado aparece a la frecuencia de 124 MHz con una potencia de -19.8 dBm, correspondiente a la frecuencia diferencia.

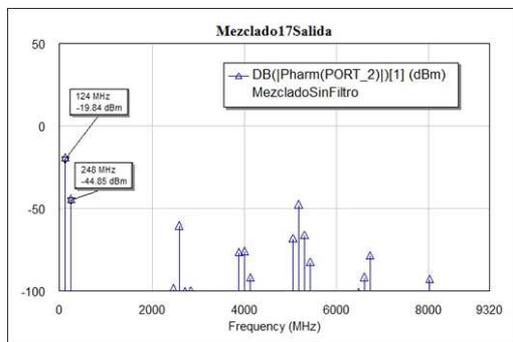


Figura 5.35: Espectro a la salida del mezclador (señales RF y OL senoidales puras)

Se vuelve a hacer hincapié en que las simulaciones que aquí se están haciendo corresponden a casos ideales donde tanto la señal de RF como la de OL se implementan con sinusoides puras, de ahí que los espectros que se muestran sean rayas espectrales. En realidad, la emisión de HI que será la entrada RF tendrá cierto ancho espectral debido al efecto doppler, por otro lado la señal generada por el oscilador no se corresponderá con una sola raya espectral sino que, aparecerán varios armónicos y además presentará cierta anchura espectral.

A continuación se incluye en la cadena de RF el filtro paso-banda con cero de transmisión en 1296 MHz, de esta forma, debido a que este filtro presenta unas pérdidas de inserción de 35 dB para la frecuencia de 1296 MHz la potencia que presentará la señal de OL en los distintos puntos del espectro será aproximadamente 35 dB menor que para el caso de no incluir este filtro. Para comprobar la importancia que tiene incluir este dispositivo en la cadena RF la Figura 5.36 muestra los espectros que se obtienen a la entrada del receptor y entre el segundo LNA y este filtro.

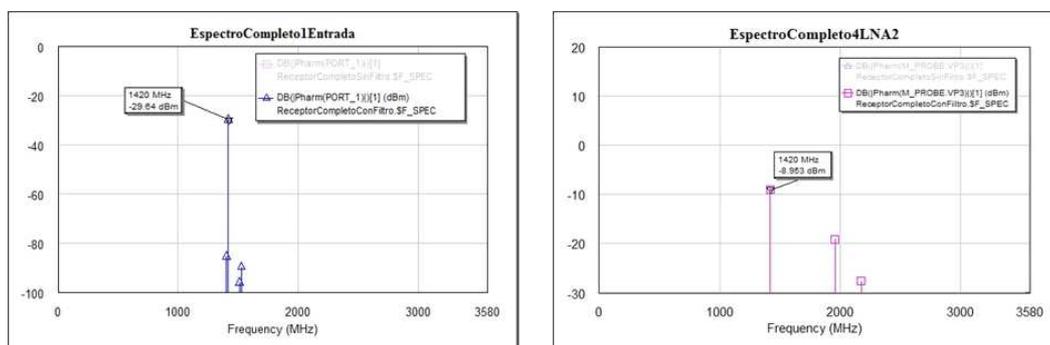


Figura 5.36: Espectro a la entrada del receptor entrenador y tras el segundo LNA (filtro paso-banda con cero de transmisión en 1296 MHz incluido)

Aún nos falta incluir el oscilador en el receptor-entrenador y realizar simulaciones del espectro en los distintos puntos, se adelanta que al realizar esto, el espectro contendrá un

mayor número de armónicos (estará más sucio) pero el comportamiento que aquí se muestre tendrá mayor similitud con el comportamiento real del receptor-entrenador. Al incluir el oscilador el esquemático que nos queda es el mostrado en la Figura 5.37. Este esquemático incluye todos los dispositivos que integran el receptor-entrenador y es a partir de él con el que se procedió a la creación del layout.

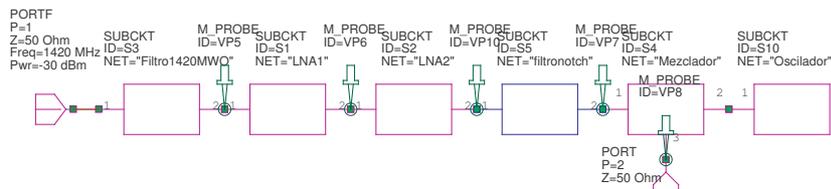


Figura 5.37: Esquemático empleado para la simulación a nivel de sistema del receptor-entrenador

Para este análisis es necesario hacer un balance de armónicos con dos tonos diferentes, uno para el generador interno del oscilador, que será el tono 1, al que se le asignarán los valores siguientes: 20 para el número de armónicos (recordemos que la señal de OL representa el armónico 12 de una señal generada por un oscilador de cuardo a 108 MHz) y 1 para el factor de muestreo. No se limitará el número de armónicos ni de productos de intermodulación. El otro tono será el tono 2 es asignado al puerto de entrada y cuyos valores en el balance de armónicos son los siguientes: 1 para el número de armónicos y 1 para el factor de muestreo.

Los resultados que se obtuvieron fueron los que se cabía imaginar, aparecieron multitud de armónicos a diferentes frecuencias que, en definitiva, “ensuciaban” el espectro. Aún así, la potencia de éstos era despreciable y se adelanta que, cuando midamos con la sonda de alta impedancia estos armónicos no se podrán detectar, pues su potencia es comparable a la del ruido. Las Figuras 5.38 y 5.37 muestran los espectros obtenidos en distintos puntos del receptor-entrenador cuando se emplean el oscilador real y un tono puro que lo simula (como habíamos hecho hasta ahora).

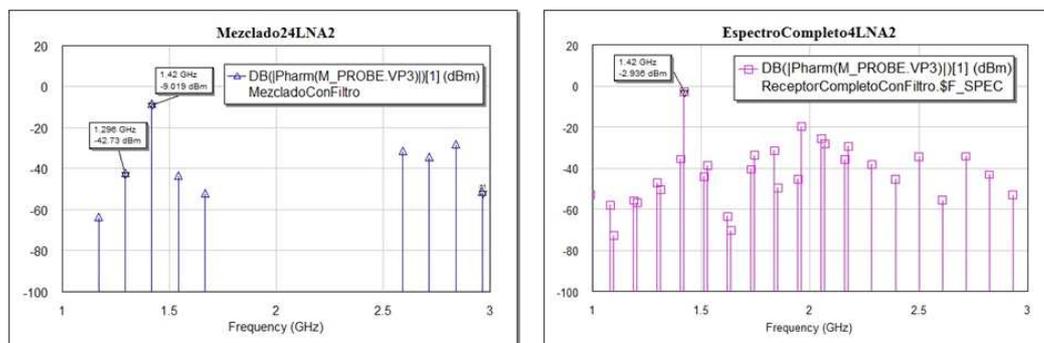


Figura 5.38: Espectros tres el segundo LNA con oscilador ideal (izquierda) y con el oscilador real (derecha)

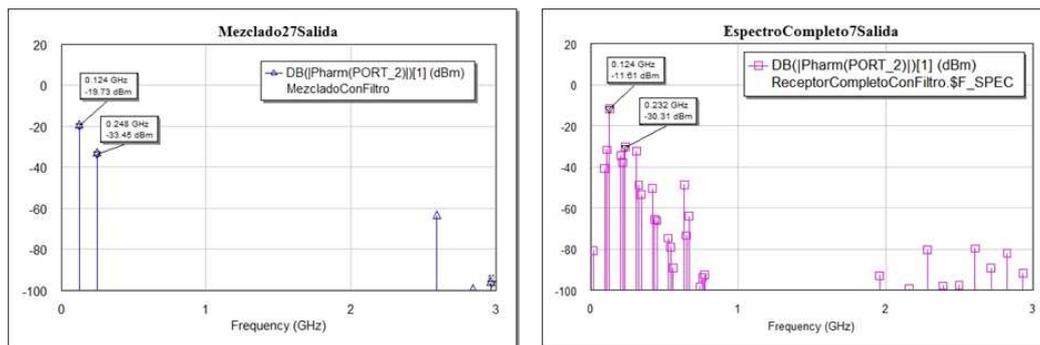


Figura 5.39: Espectros de salida con oscilador ideal (izquierda) y con el oscilador real (derecha)

5.4. Generación del layout y fabricación del receptor-entrenador

MWO tiene una herramienta para la generación del layout, esta herramienta permite la obtención del layout de una forma casi automática. Partimos del esquemático final, el que incluye la cadena de RF completa (filtro paso-banda de entrada seguido de dos LNAs en cascada y el filtro paso-banda con cero de transmisión en 1296 MHz), el mezclador y el oscilador (ver Figura 5.40). Para obtener el layout final se debieron importar los layout ya diseñados de los subsistemas individuales.

La interconexión de todos los dispositivos se realizó con líneas de transmisión con impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$ que, para la frecuencia de 1420 MHz y con el sustrato empleado corresponde con líneas con una anchura $W = 1,9$ mm. Puesto que todos los dispositivos a interconectar presentan en todos sus puertos impedancias de 50Ω a estas líneas de interconexión se le puede dotar de la longitud que sea necesaria.

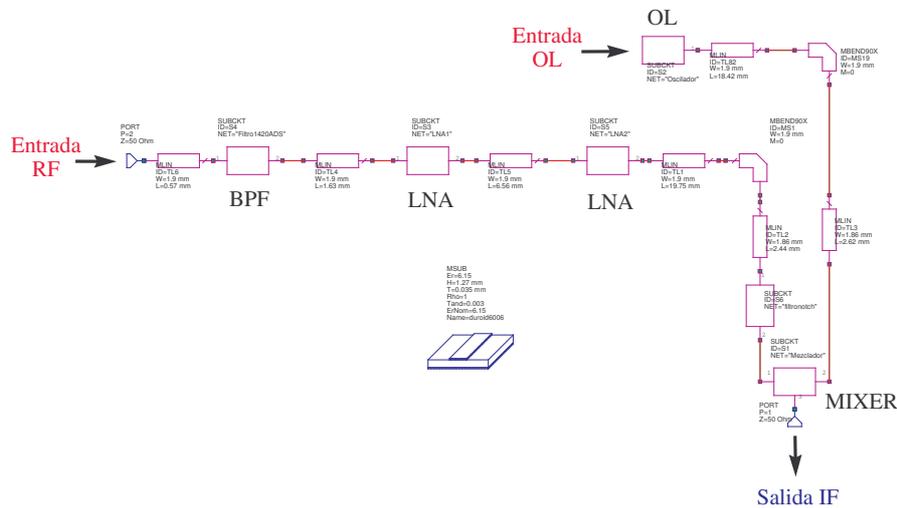


Figura 5.40: Esquemático MWO del receptor entrenador y líneas de interconexión

Recordemos que el receptor-entrenador se pretende emplear como herramienta docente, en este sentido, la distribución de los distintos elementos se realizó atendiendo a que éste presentara un aspecto compacto pero en el que a su vez, aparecieran diferenciados y aislados los distintos subsistemas que lo forman. Para aislar unos dispositivos de otros lo que se hizo fue subir el plano de masa de la capa inferior a la capa superior en aquellas zonas de separación entre subsistemas (puede verse en color naranja en la layout mostrado por la Figura 5.41). Luego, en el proceso de fabricación lo que se hará será colocar diversos via-holes que conecten el plano de masa inferior con el plano de masa superior.

Otra cuestión importante para la generación del layout fue el llevar las líneas de alimentación allí donde eran necesarias. Para alimentar los LNAs se requieren 0.9 V DC, puede verse dos isletas azul claro en el layout. También era necesario polarizar los amplificadores empleados en el oscilador y el cristal de cuarzo, en este caso la tensión de polarización es de 9 V y pueden verse unas isletas azul oscuro en el layout.

La generación del layout se finalizó con el programa CircuitCam 4.0. para éllo se importó el layout MWO en formato `.gerber`. En este caso en concreto sólo se importó la capa superior (TopLayer, ver Figura 5.42), la capa inferior (Bottomlayer) sería diseñada íntegramente en CircuitCam.

Puede observarse en la Figura 5.43 que en la capa inferior se han incluido una serie de “isletas” que permiten alimentar los dispositivos activos que integra el receptor-entrenador. En la esquina superior izquierda de esta Figura se ha incluido un partidor de tensión del que

se podrán obtener los 9 V que requiere el oscilador y los 0.9 V que requieren los LNAs, además, se incluirá un interruptor que permitirá activar o desactivar el oscilador.

Otra cuestión importante para generar el layout fue incluir los via-holes que conectarían el plano de masa inferior con la capa superior. La colocación de estos via-holes no es una cuestión trivial, se debía tener en cuenta que aquellos dispositivos que debieran estar conectados a masa tuvieran un via-hole lo más cerca posible. Recordemos que a frecuencias de microondas, la longitud de los “cables ” es un factor vital, por ésto los via-holes se deben colocar tan cerca de los elementos que lo requieran como sea posible, para garantizar una conexión a masa real.

El resto de los via-holes se colocaron de manera que el plano de masa superior quedará “fuertemente” conectado a masa. La Figura 5.44 muestra el layout final del receptor-entrenador, a partir de él se generan los ficheros que controlan la microfresadora empleada para la fabricación. Se entró más en detalle sobre el aspecto de fabricación en 5.2.1.

El receptor-entrenador no pudo ser fabricado a tiempo, pues el nuevo departamento de fabricación de la UPCT no disponía en aquél momento de la tecnología y los medios necesarios para realizar los numerosos via-holes que se habían incluido en el receptor-entrenador. Normalmente para fabricar estos via-holes se realizan los agujeros y posteriormente se someten a procesos electroquímicos de metalización, la otra alternativa que quedaba era realizar uno a uno los via-holes y ésto resultaba una labor excesivamente tediosa y los resultados estéticos que se lograrían dejarían bastante que desear. Por estos motivos la fabricación y posterior testeo del receptor-entrenador se contempla cómo una línea futura.

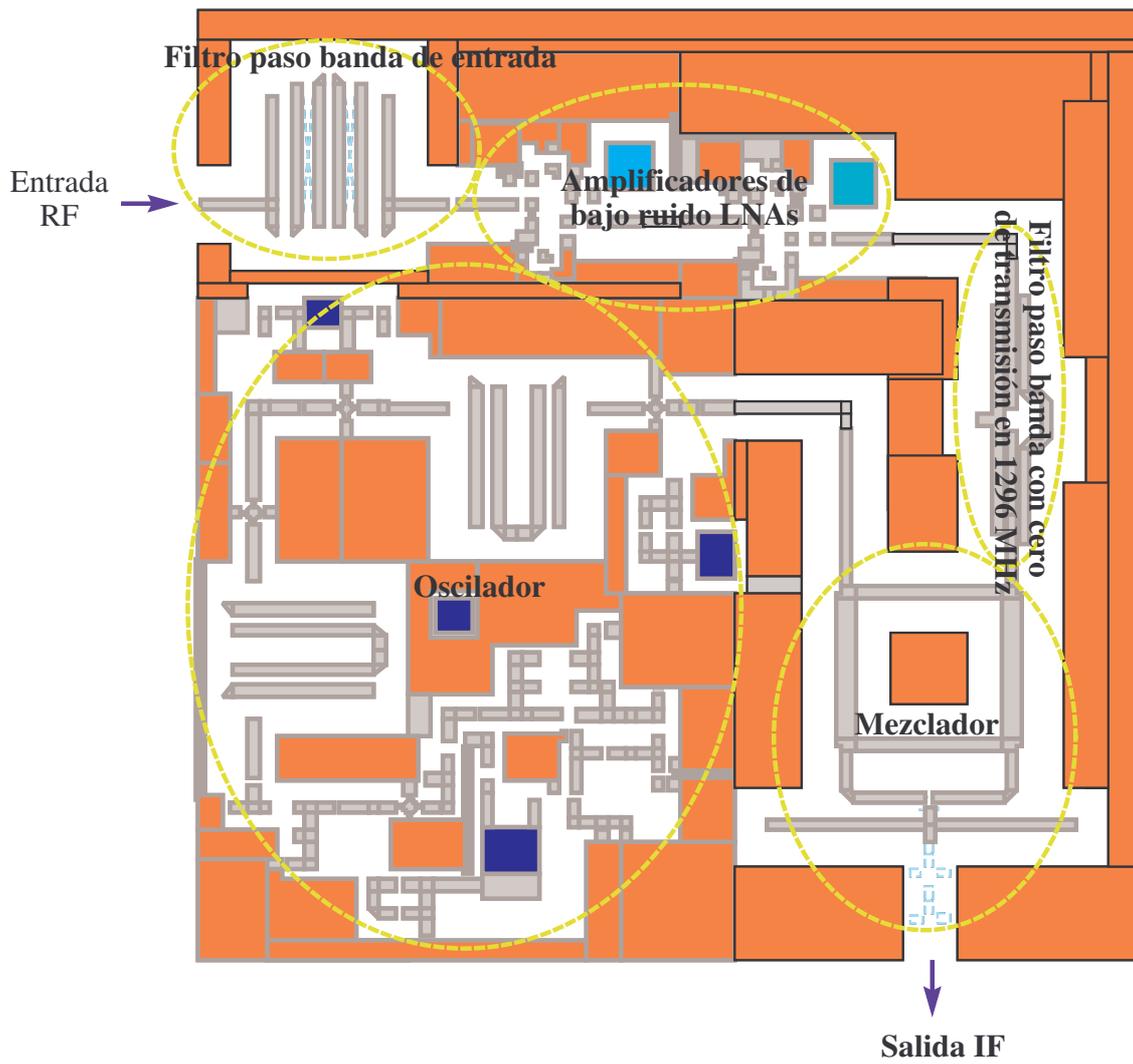


Figura 5.41: Layout MWO del receptor entrenador (Toplayer exclusivamente)

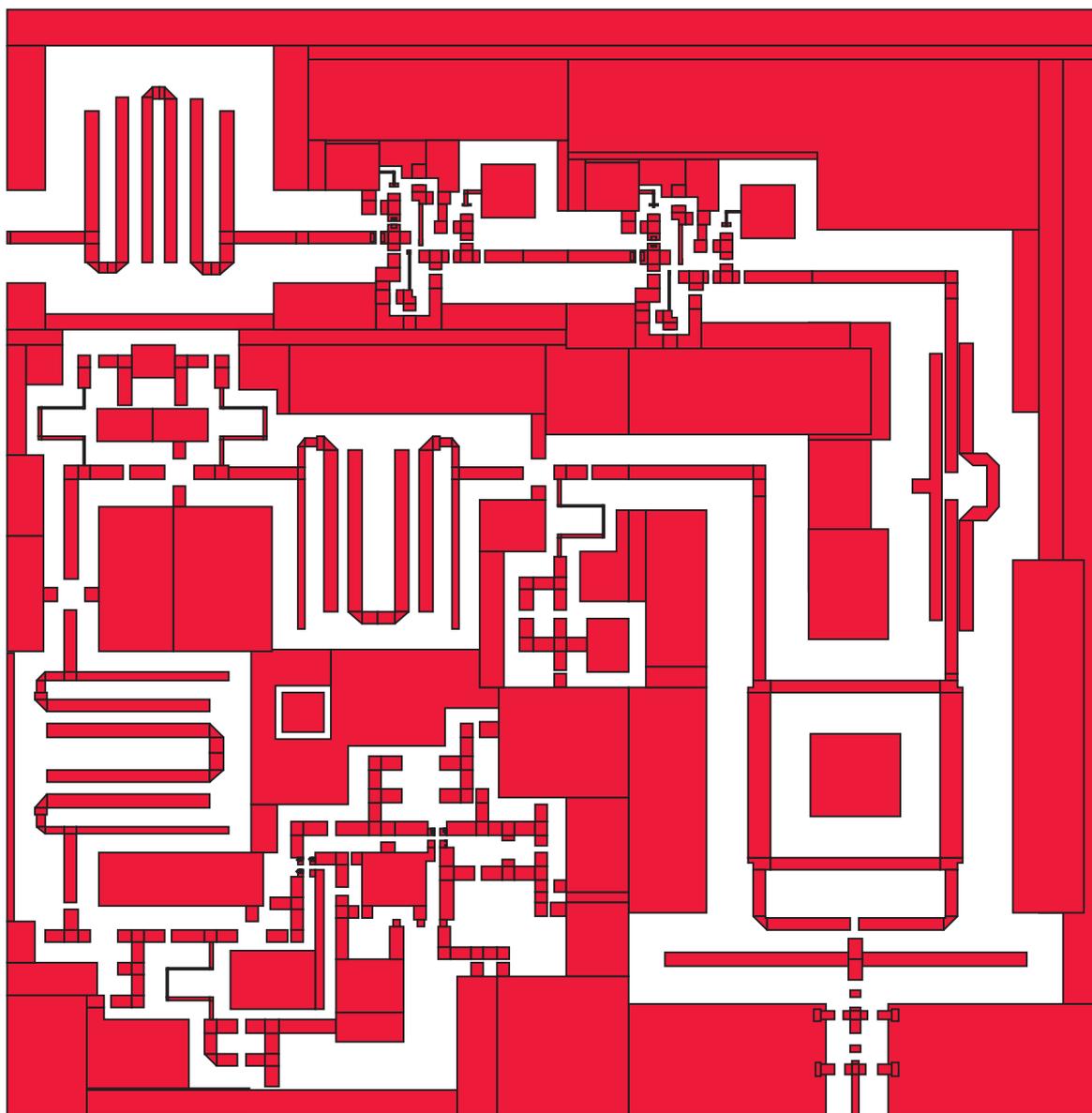


Figura 5.42: TopLayer del receptor-entrenador

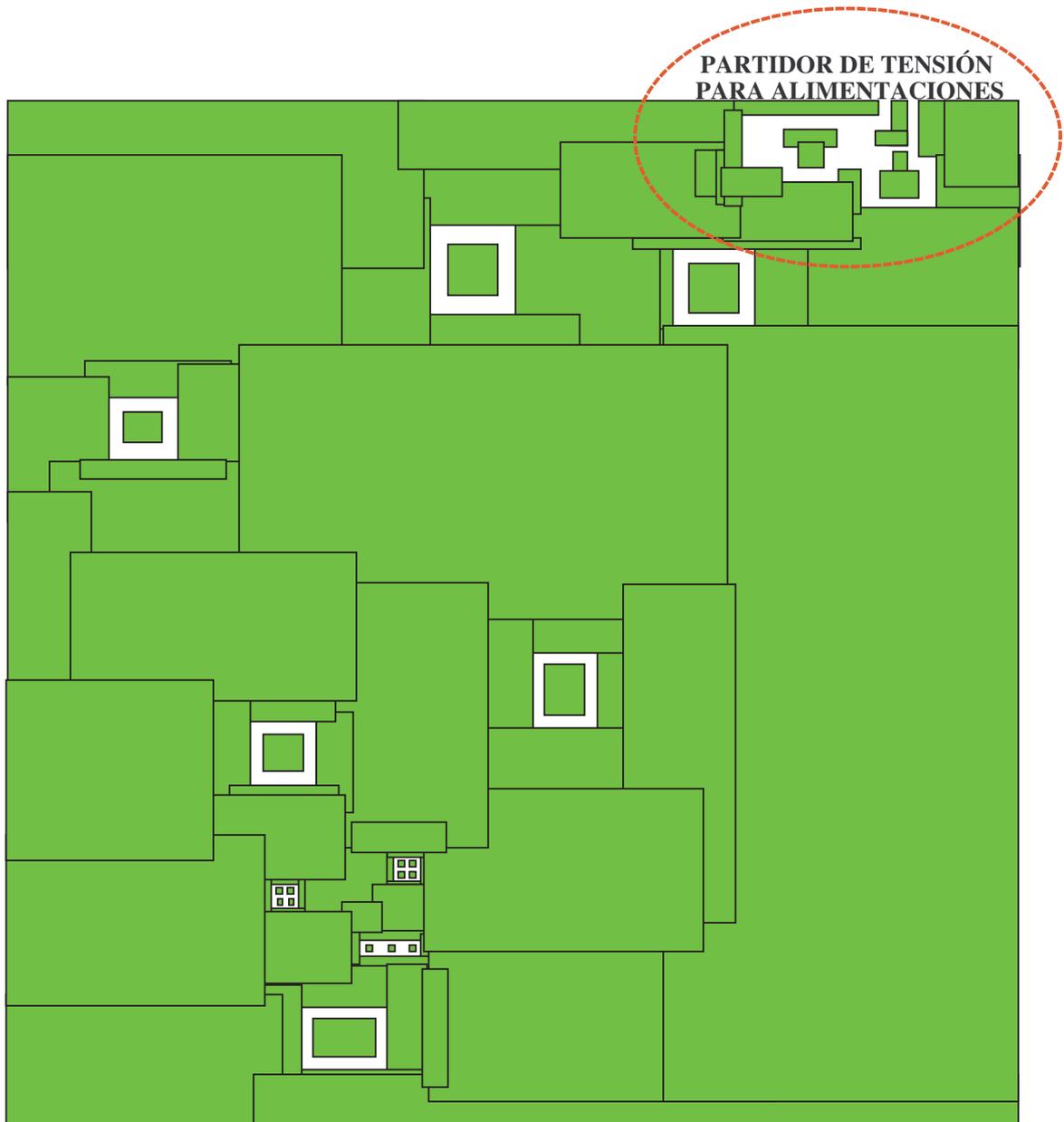


Figura 5.43: BottombLayer del receptor-entrenador

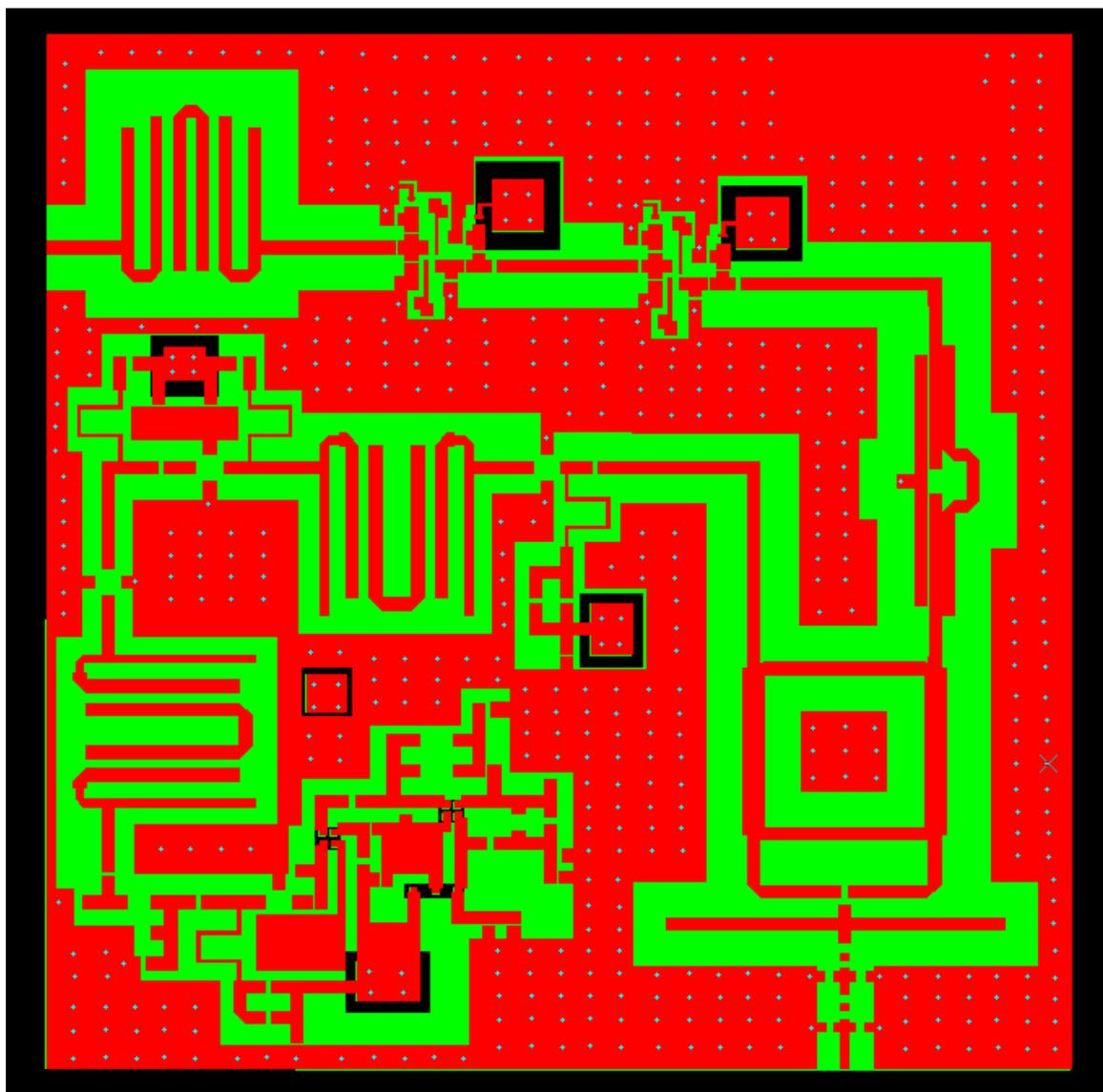


Figura 5.44: Layout final del receptor-entrenador

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

Antes de mi colaboración en el proyecto ARIAM ya se había trabajado mucho en el diseño y fabricación de dispositivos que se emplearían como parte del receptor-entrenador pero, hacia falta de alguna manera sacar a relucir todo el trabajo y esfuerzo que alumnos y profesores de la ETSIT llevaban realizando desde hacia tiempo.

En este sentido con mi incorporación al proyecto, se realizó un análisis de lo que se disponía y de lo que se iba a necesitar para poner en marcha el Radiotelescopio. Revisé el estado del arte de una ciencia hasta ese momento desconocida para mí y estude las características de la tecnología que la Radioastronomía lleva asociada. Comencé con la búsqueda de la antena receptora y el resto de equipos, barajando diferentes alternativas de compra y optando por aquellas que mejor se adaptaban a nuestras necesidades.

Se inició un trabajo conjunto y multidisciplinar con otras Universidades, se realizaron análisis del espectro electromagnético que se tenía en la ubicación elegida para el Radiotelescopio de la UPCT, con el fin de comprobar que estábamos libres de posibles interferencias que dificultaran nuestras observaciones. Se elaboraron informes técnicos e incluso se realizaron visitas a otras Universidades con el fin de estudiar la tecnología que en ellas se empleaba y aportar con nuestro trabajo y conocimiento mejoras a sus radiotelescopios.

También se ha colaborado en el diseño y fabricación del receptor-entrenador, herramienta que tampoco ha podido ser terminada por motivos ajenos a mi voluntad.

Por supuesto que, con este PFC, aunque se hubiera logrado terminar de instalar y poner en marcha el radiotelescopio, no finaliza el trabajo que se tiene que realizar. Todo lo contrario, el proyecto ARIAM nació y seguirá desarrollándose atendiendo a las inquietudes de alumnos, profesores y resto de público que quieran colaborar en este proyecto. Por tanto, de éste y de otros PFC se desprenden una serie de líneas futuras que darán lugar a nuevos PFCs. Entre estas líneas futuras, por ser las más cercanas, cabría destacar las siguientes:

- Terminar de instalar y poner en marcha la antena receptora y el resto de equipos.
- Terminar de fabricar el receptor-entrenador, testearlo y desarrollar un manual de usuario.

- Desarrollar herramientas software que permitan el control automático de la antena, así como el procesado de las señales recibidas.
- Mejora de los distintos subsistemas que integran el receptor-entrenador, así cómo mejora del receptor-entrenador a nivel de sistema.
- Desarrollo del aula-taller de Radioastronomía y elaboración de los materiales didacticos que en élla se empleen.
- Intercambio de tecnologia y conocimiento con otras Universidades.

Cómo una línea futura que sin duda mejoraría las características del Radiotelescopio de la UPCT cabría destacar la incorporación de una nueva antena receptora con la que se pudieran realizar prácticas de interferometría de corta base.

Me hubiera encantado poder terminar a tiempo y haberlo podido incluir en este texto todo lo que tuvo que ver con la instalación y puesta en marcha del Radiotelescopio. De nuevo, quiero aprovechar estas líneas para hacer pública mi intención de finalizar con la puesta en marcha de éste, cosa que haré en el momento en que sea posible. . .

Cartagena, Febrero de 2009

Bibliografía

- [1] PARTNER, *Proyecto Académico con el Radiotelescopio de la NASA en Robledo.*
- [2] Mónica Moragón Serrano. *DISEÑO DE UN OSCILADOR EN LA BANDA DE 1200MHz COMO PARTE DE UN RECEPTOR DE MICROONDAS PARA APLICACIONES DE Radioastronomía.*
- [3] Francisco Javier Sandoval Piqueras. *MEJORAS EN EL DISEÑO DE UN MEZCLADOR EN LA BANDA DE LOS 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE RADIOASTRONOMIA.*
- [4] Pedro Enrique Ros Avilés. *DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MEZCLADOR BALANCEADO EN LA BANDA DE 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE RADIOASTRONOMÍA.*
- [5] Francisco Javier Molero Madrid. *DISEÑO DE UN RECEPTOR ÓPTIMO EN LA BANDA DE 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE Radioastronomía.*
- [6] Antonio Martinez Gonzalez, David Sánchez Hernández y Maria Eugenia Requena Pérez. *RADIACIÓN Y COMUNICACIONES.*
- [7] Gonzalo Peñafiel Beltrán. *ESTUDIO DE TÉCNICAS DE DISEÑO PARA REDUCIR EL NIVEL DE RUIDO EN DISEÑOS DE LNAs PARA UN RADIOTELESCOPIO EN LA BANDA DE 1400 MHz.*
- [8] Ricardo Alarcón Llamas. *DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO EN LA BANDA DE 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE RADIOASTRONOMÍA.*
- [9] Anna Kamasheva. *MEJORA EN EL DISEÑO DEL AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO EN LA BANDA DE 1420 MHZ PARA APLICACIONES DE RADIOASTRONOMÍA.*
- [10] Ramón Angosto Sánchez. *ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA ANTENA PARABÓLICA PARA UN RADIOTELESCOPIO EN LA BANDA DE 1420 MHZ*
- [11] José Luis Gómez Tornero. *ANÁLISIS DE REDES DE MICROONDAS.*
- [12] Radioastronomy Supplies www.radioastronomisupplies.com
- [13] RF HAMDESIGN www.rfhamdesign.com

- [14] David Cañete Rebenaque, Fernando D. Quesada Pereira, Jose L. Gómez Tornero, Alejandro Álvarez Melcón (Technical University of Cartagena) and Marco Guglielmi (European Space Agency). *A New Family Of Microstrip Open-Loop Resonator Filters For High-Selectivity*

ANEXO 1.

Medida y Análisis de Emisiones Radioeléctricas en el
Campus de la Universidad Politécnica de Cartagena.



Medida y Análisis de Emisiones Radioeléctricas en el Campus de la Universidad Politécnica de Cartagena

Elaborado por: *Jesús Mora Rodríguez,* e-mail: jemorobig@gmail.com
Marta Rodríguez García, e-mail: martarg9@hotmail.com
Alumnos de 5º curso de Ingeniería Superior de Telecomunicación

Supervisado por: *Dr. José Luis Gómez Tornero*
Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones
Dep. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena
e-mail: josel.gomez@upct.es teléfono: 968326531

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MEDIDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	3
2.1 Equipos utilizados	3
2.2 Lugar donde se analizó el espectro electromagnético	5
2.3 Montaje.....	6
2.4 Parámetros del analizador de espectros.....	7
2.5 Servicios en la banda 500MHz–2300MHz.....	7
3. RESULTADOS	8
3.1 Medidas realizadas en la esquina E	8
3.2 Medidas realizadas en la esquina S	9
3.3 Espectro de los servicios detectados.....	11
4. SOLUCIONES A POSIBLES INTERFERENCIAS	14



1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio forma parte del proyecto ARIAM (Aula-taller de Radioastronomía e Ingeniería de Antenas y Microondas). Se trata de un ambicioso proyecto dirigido por el profesor Dr. José Luís Gómez Tornero, que cuenta con el apoyo y colaboración de diversas instituciones, profesores, alumnos y personal investigador.

Este proyecto tiene una serie de objetivos técnicos y sociales entre los que destacan:

- Diseño y puesta en marcha de un pequeño **radiotelescopio** para detectar las emisiones de HI, formado por una antena parabólica de 4.5 m de diámetro, un receptor de microondas y equipos de procesado y control.
- Desarrollo de una herramienta docente consistente en un **receptor entrenador** que permita al visitante comprender el procesado que sufre la señal de microondas desde que se recibe del espacio hasta que se visualiza en un ordenador.
- Creación de un **aula-taller** de radioastronomía donde poder recibir visitas y realizar tareas de divulgación.
- Aumentar el **interés público** por una ciencia tan apasionante como desconocida como es la radioastronomía y la astronomía en general.
- Realizar un trabajo conjunto con otras universidades con el fin de promover el **intercambio interterritorial** de ideas y conocimientos.

Aunque ARIAM es un proyecto que estará en continuo desarrollo, actualmente se encuentra en fase de búsqueda de emplazamiento y puesta en marcha del radiotelescopio. El emplazamiento del radiotelescopio ha de tener un cielo despejado, donde se puedan realizar buenas observaciones, en nuestro caso, se ha optado por colocar la antena en la azotea del edificio I+D+I que se encuentra dentro del campus de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), muy próximo al edificio de la Escuela técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT).

Si para realizar buenas observaciones es importante tener un cielo despejado, más importante es tener un cielo libre de emisiones radioeléctricas, al menos en la banda de interés, 1420 Mhz. De forma que resulta de vital importancia conocer las emisiones radioeléctricas que rodean el emplazamiento de nuestro radiotelescopio.

Se ha de tener en cuenta, que la radiación electromagnética que recibimos del espacio es muy débil, comparable al ruido térmico. Por ésto, es importante que el sistema receptor (antena + receptor de microondas) presente una elevada ganancia y un bajo factor de ruido.

Para conocer las emisiones radioeléctricas que son visibles desde la azotea del edificio I+D+I, hemos realizado unas medidas de las mismas.

2. MEDIDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La finalidad de nuestro estudio es la de analizar el espectro radioeléctrico en el emplazamiento donde situaremos la antena receptora, de manera que podamos identificar posibles señales que interfieran en la banda de interés (en torno a 1420 MHz).

Seguidamente se describen los equipos que empleamos para la toma de medidas, el lugar donde se realizaron, el montaje de los equipos y las consideraciones que se han de tener en cuenta a la hora de realizar las medidas.

2.1 Equipos utilizados

- **Analizador de espectros y de redes** Rohde&Schwarz ZVL6, cuyo rango de frecuencias de trabajo es de: 9 KHz a 6GHz.



- **Ordenador portátil** Intel Core 2 Duo a 1,6 GHz , 1 GB de memoria RAM que permite la representación y análisis de las medidas.



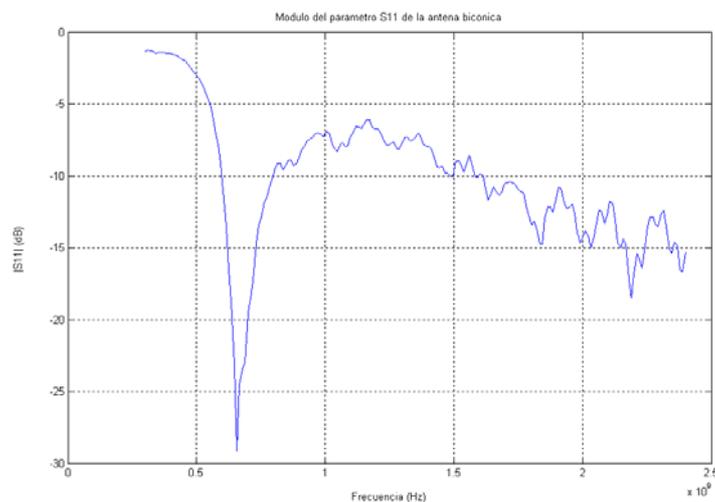
Para el análisis y representación de los datos obtenidos con el analizador de espectro se ha empleado el programa MATLAB versión 7.0.

- **Antena biconica** de Schwarzbeck, cuyas características se exponen a continuación:

- Rango frecuencial de trabajo: 500-3000 MHz
- $P < 20W$
- Impedancia: 50Ω
- Su diagrama de radiación es casi omnidireccional, es decir, es capaz de recibir radiación desde cualquier dirección, de esta forma no es necesario realizar ningún apuntamiento de la misma.



Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la antena para el rango frecuencial citado, hemos medido su parámetro S_{11} , obteniendo los siguientes resultados.



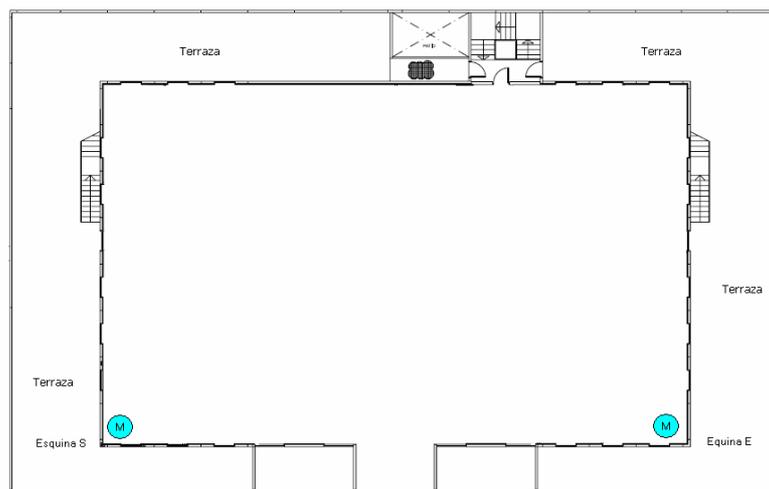


Para la medida de dicho parámetro hemos empleado el analizador de redes. Como se puede comprobar la antena trabaja bien para el rango de frecuencias que queremos medir, 500-2300 Mhz, ya que el parámetro S_{11} , que representa la adaptación de una antena ha de tener un valor bajo en ese rango, de manera que toda la potencia se radie y nada se refleje hacia el circuito al que esté conectada.

- **Cable coaxial** de altas prestaciones, bajas pérdidas y 50Ω de impedancia característica.
- **Trípode** que da soporte a la antena.

2.2 Lugar donde se analizó el espectro electromagnético

Como se adelantó en la introducción, el emplazamiento de nuestro radiotelescopio se sitúa sobre la azotea del edificio I+D+I. La antena se colocará en la esquina Este del edificio, no obstante, en un futuro próximo, se pretende colocar una segunda antena en la esquina Sur que nos permita realizar técnicas de interferometría de corta distancia. Por esto, y para buscar el mejor emplazamiento, se realizaron las mismas medidas en ambas esquinas. Las siguiente figura muestra la distribución de la azotea del edificio I+D+I y la localización del mismo.



Azotea del edificio I+D+I.



Localización del edificio I+D+I

2.3 Montaje

El montaje para realizar las mediciones es sencillo, se ha de conectar la antena bicónica al analizador de espectros a través del cable coaxial de altas prestaciones. La antena se coloca sobre un trípode que permite su enfoque a distintos puntos. La siguiente imagen ilustra el montaje.





2.4 Parámetros del analizador de espectros

A la hora de la toma de medidas con el analizador de espectros (en nuestro caso el Rohde&Schwarz ZVL6), es muy importante tener en cuenta una serie de parámetros que marcaran la calidad de las mismas. Por un lado, se ha de tener en cuenta el ancho de banda de resolución (“*Resolution BandWidth*”, RBW), que determina la separación frecuencial de dos muestras adyacentes (nuestro analizador permite un RBW mínimo de 300 Hz).

Por otro lado, se tiene el ancho del espectro a analizar (SPAN), nuestro analizador permite trabajar en un rango de 9 kHz a 6GHz. Si se quiere realizar medidas con una gran resolución, en las que sea posible discernir estrechas emisiones, es necesario emplear un RBW pequeño. En contraparte, elegir un RBW pequeño supone un elevado tiempo de procesado, por lo que existe un férreo compromiso entre tiempo de procesado y la resolución de las medidas.

Además, se ha de tener en cuenta que los ficheros de salida del analizador contienen un número finito de muestras, por lo que si se elige un SPAN demasiado grande, la resolución de la medida no vendrá dada por el RBW, sino por el cociente entre el SPAN y el número de muestras del fichero de salida. Por lo tanto, para obtener un fina resolución, se ha llevado a cabo un enventanado del espectro, es decir, se ha ido analizando “a trozos”, empleando pequeños SPAN de 200 MHz con un valor del RBW de 10 KHz.

2.5 Servicios en la banda 500MHz–2300MHz

A continuación se detallan algunos de los servicios que encontraremos en la banda analizada, con su correspondiente canalización, y el tipo de modulación y multiplexación empleada.

Servicio	Banda de frecuencia (MHz)	Ancho de banda del canal	Modulación	Multiplexación
TV analógica	470/830	8 MHz	Video AM Audio FM	FDMA
TDT	830/862	8 MHz	64-QAM	OFDMA
TETRA	916/921	25 KHz	DQPSK	TDMA
GSM-900	925/960	200 KHz	GMSK	TDMA
GSM-1800	1805/1880	200 KHz	GMSK	TDMA
UMTS	2110/2200	5 MHz	H-QPSK	WCDMA



Para asegurar la representación de los canales de todos los servicios vistos en la tabla anterior, empleamos un RBW de 10KHz.

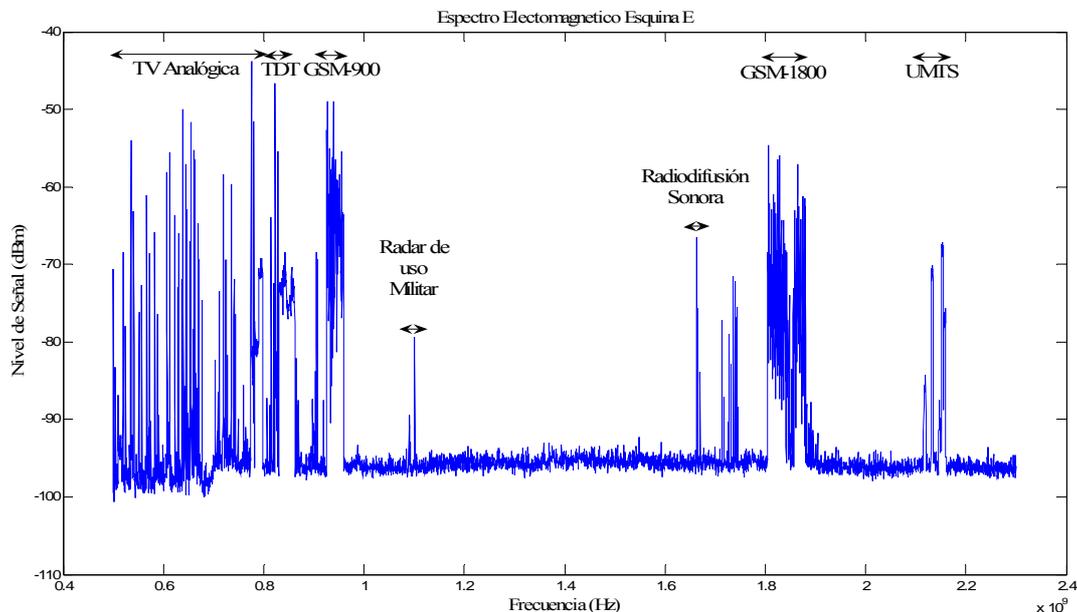
3. RESULTADOS

El analizador de espectros permite exportar ficheros ASCII que contienen los datos medidos. Posteriormente, estos datos son manipulados y procesados con Matlab. Como se adelantó, tomamos medidas en dos de las cuatro esquinas de la azotea del edificio I+D+I.

El análisis del espectro se ha realizado empleando SPAM de 200 Mhz, de este modo, puesto que barremos de los 500 Mhz hasta los 2300 Mhz, obtenemos 9 ficheros distintos. El primero analiza desde los 500 Mhz hasta los 700 Mhz, el segundo desde los 700 Mhz hasta los 900 Mhz, y así sucesivamente. Además, se analiza el espectro con una fina resolución en una reducida banda en torno a la frecuencia de interés, 1420 Mhz

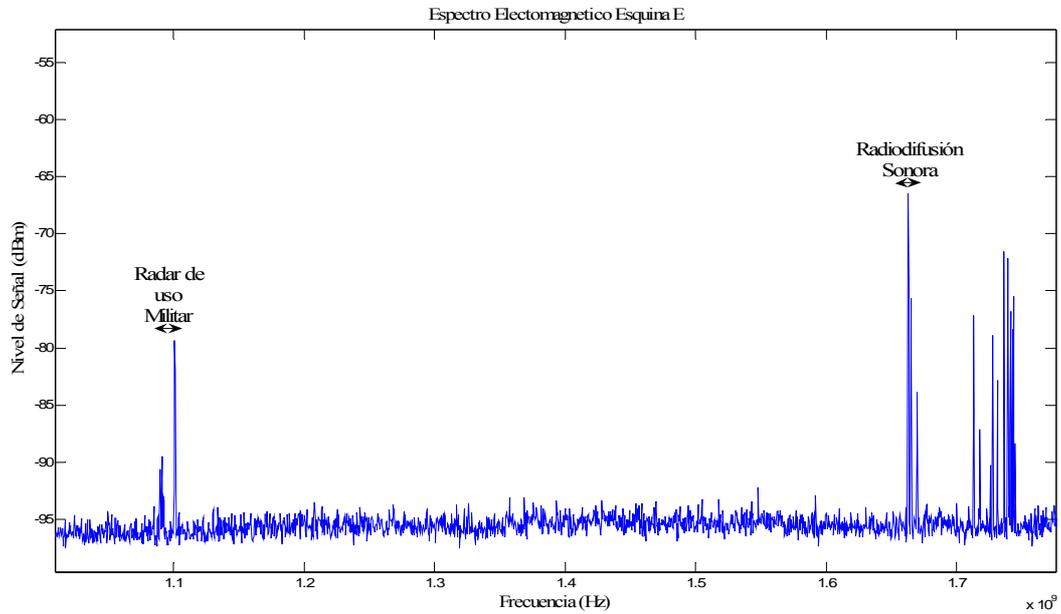
3.1 Medidas realizadas en la esquina E

Primeramente, se representa el espectro total desde 500 Mhz hasta 2300 Mhz.



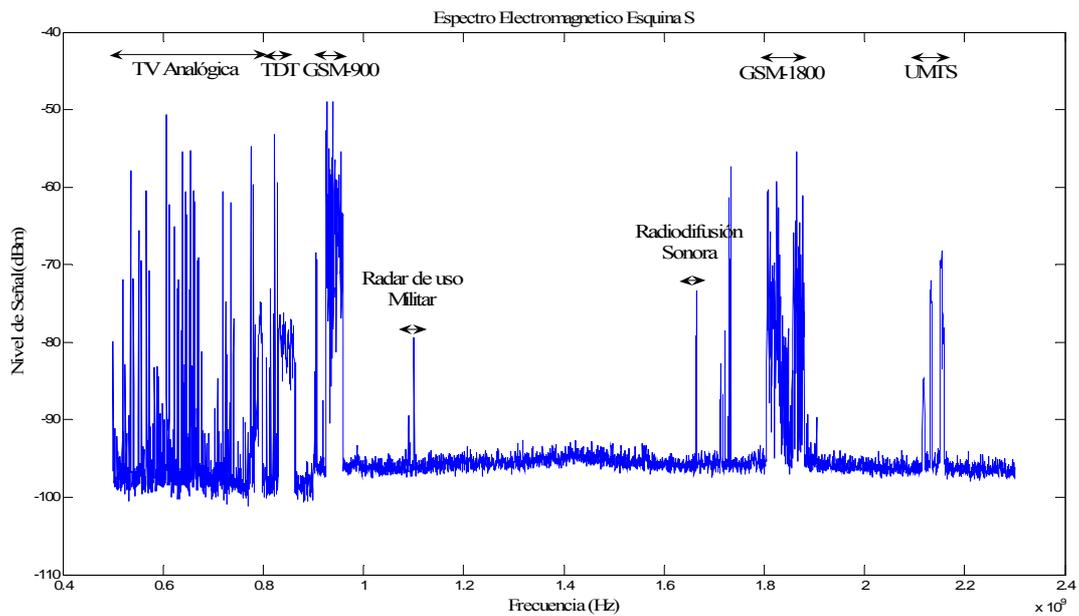
Se puede observar que entre 1200 MHz y 1600 MHz el espectro está “limpio de señales”, por lo que, a priori, no tenemos ninguna interferencia que dificulte el trabajo en nuestra banda de interés.

La siguiente imagen corrobora lo anterior.



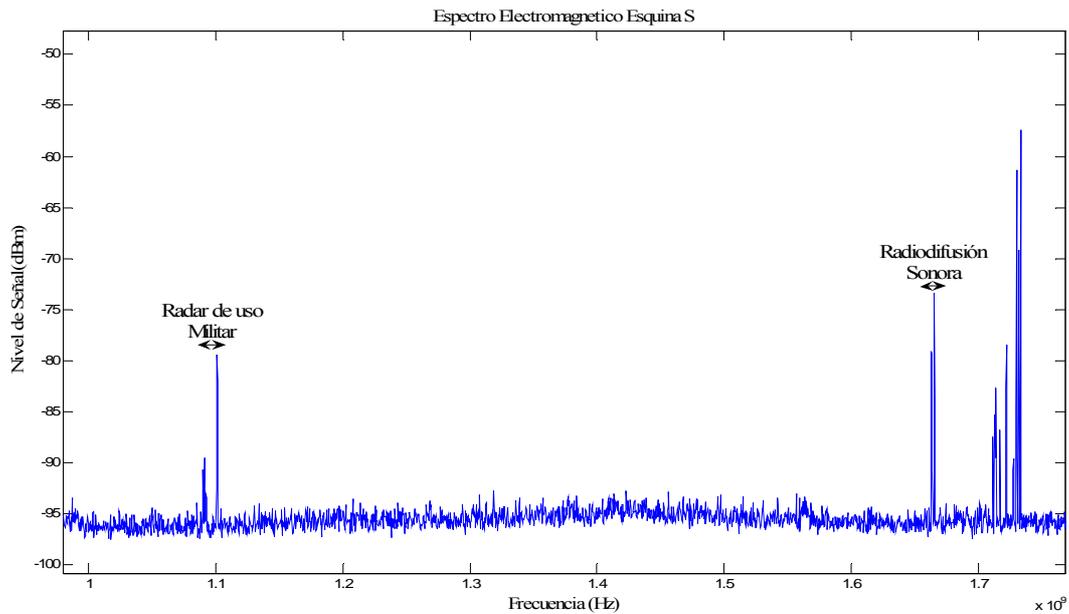
3.2 Medidas realizadas en la esquina S

El espectro observado en la esquina S debería ser similar al observado en la esquina E, no obstante, éste se muestra a continuación.





A priori, no se observa ninguna interferencia que pueda dificultar la detección de las emisiones de HI. Aunque el nivel de señal recibido por el radiotelescopio es bajo, comparable al ruido, éste por ser blanco (de media cero), por integración, puede ser “eliminado”, quedándonos solo con la emisión de HI.

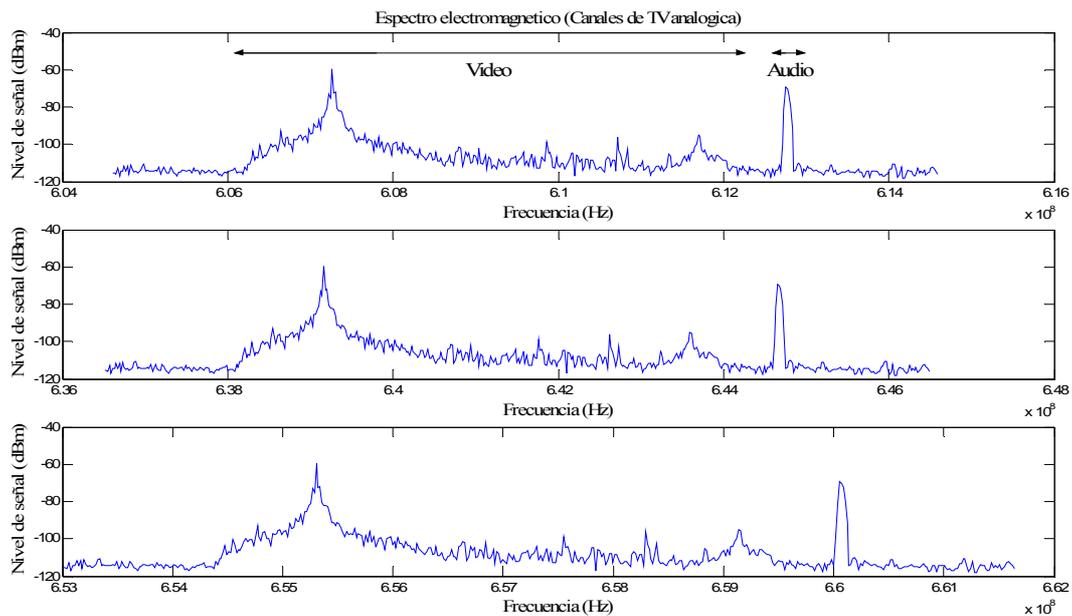


Notar que la banda de interés se encuentra limpia y la potencia del ruido detectada y generada por el analizador de espectros se sitúa alrededor de -95 dBm.

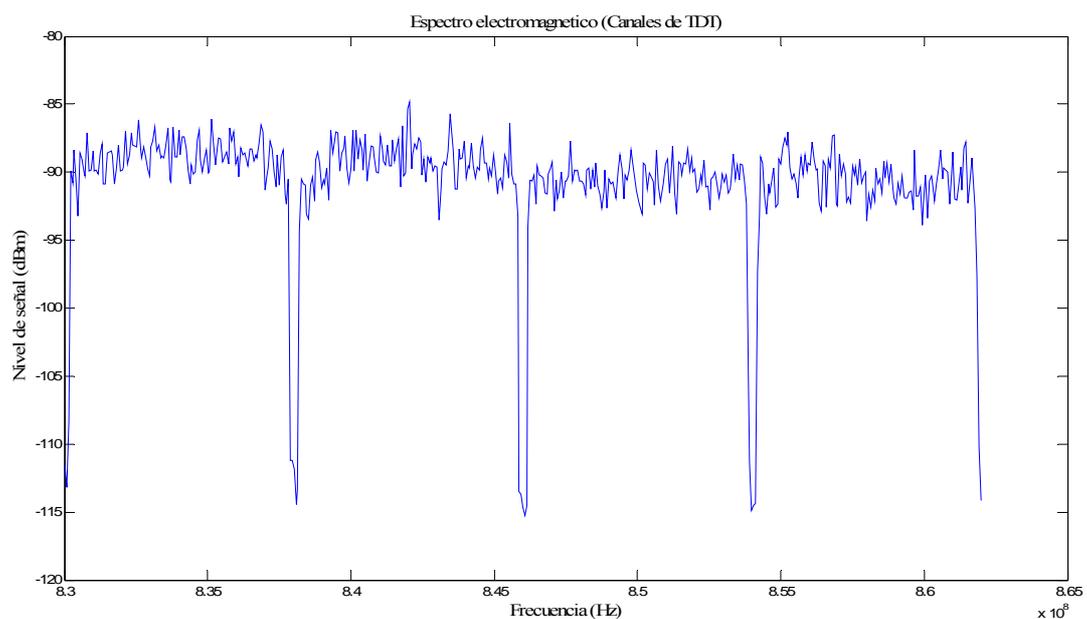
3.3 Espectro de los servicios detectados

En este apartado mostramos detalladamente los espectros de los distintos servicios. Esto nos ayudará a localizar e identificar la posible interferencia que dificulta las observaciones de los compañeros de la Universidad de Valencia.

- **Televisión Analógica (470MHz-830MHz, BW=8MHz)**



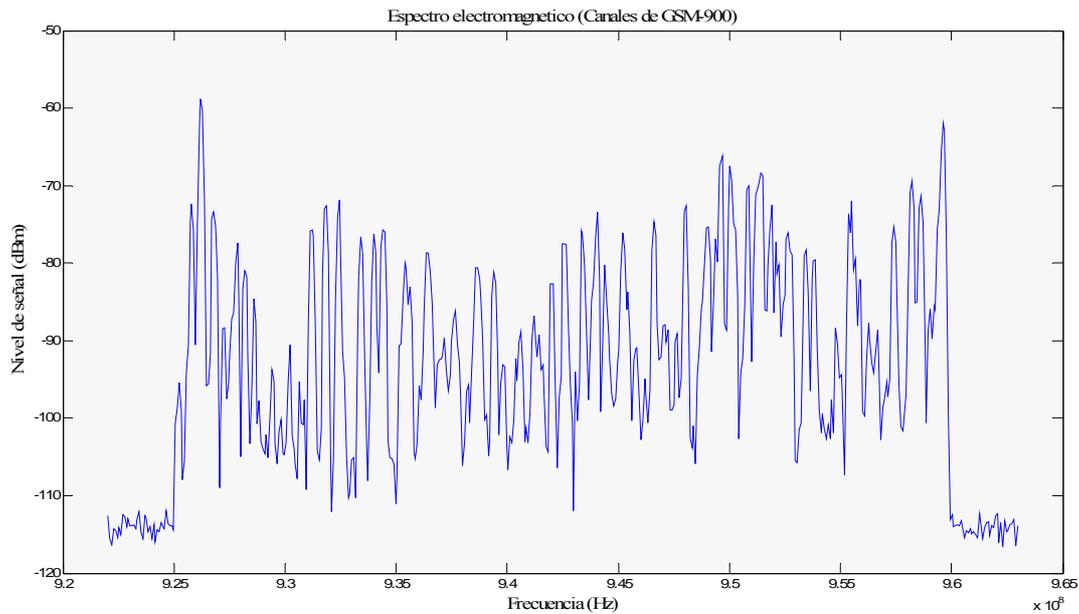
- **TDT (830MHz-862MHz, BW=8MHz)**



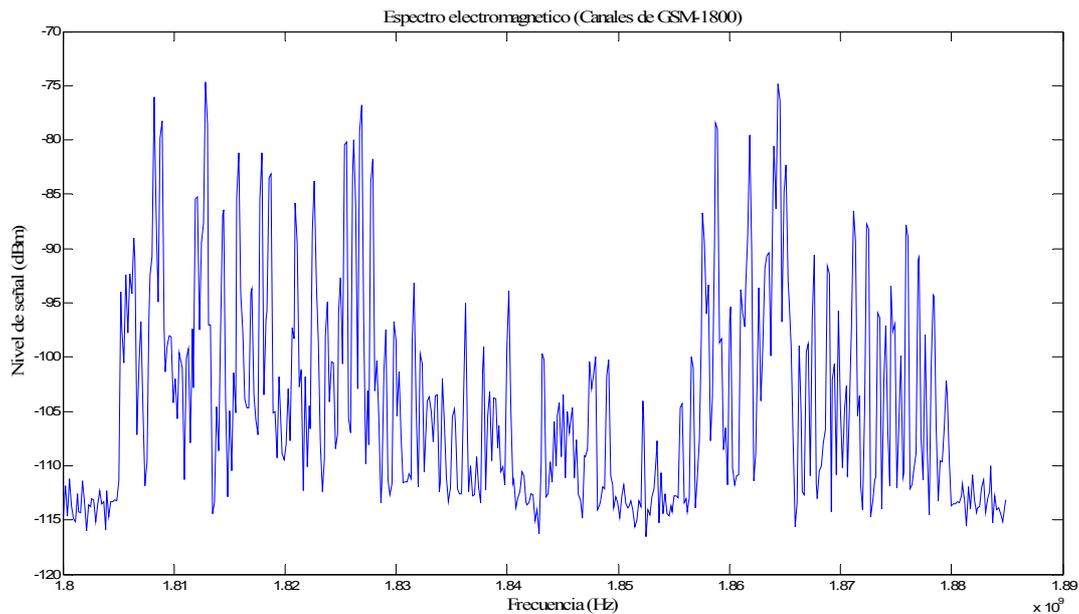


Notar las diferencias existentes entre la TV analógica y la TV digital. La primera es mucho más susceptible al ruido y es mucho menos eficiente espectralmente.

a) GSM-900 (925MHz-960MHz, BW=200KHz)

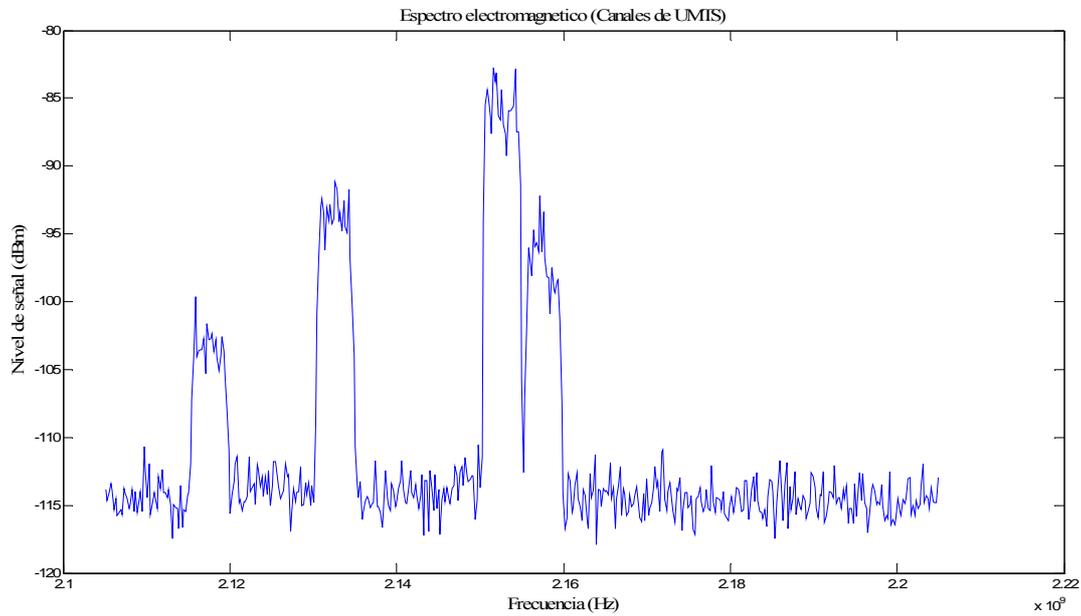


b) GSM-1800 (1805MHz-1880MHz, BW=200KHz)





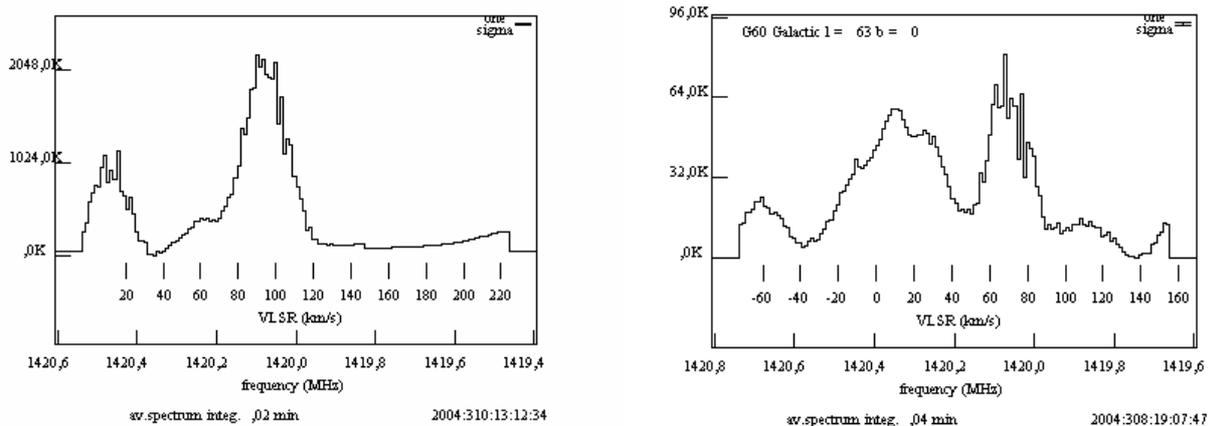
c) UMTS (2110MHz-2200MHz, BW=5MHz)



Se pueden comparar las figuras anteriores con la tabla de la sección 2.5 para comprobar que, efectivamente, se trata de los espectros de los servicios indicados. Resulta de gran interés reconocer los espectros de la TV analógica, pues se piensa que la interferencia que dificulta las observaciones en el radiotelescopio de la Universidad de Valencia, puede deberse al tercer armónico de un canal de TV analógico.

4. SOLUCIONES A POSIBLES INTERFERENCIAS

Es posible encontrarnos con alguna interferencia en torno a los 1420MHz que dificulte las observaciones. Los compañeros de la Universidad de Valencia (UV) tienen este problema. En la siguiente figura se pueden observar dos espectros en la línea del hidrógeno recibidos por el Radiotelescopio de la UV, uno de ellos sin interferencia (izquierda), y otro con una fuerte interferencia (espectro de la derecha).



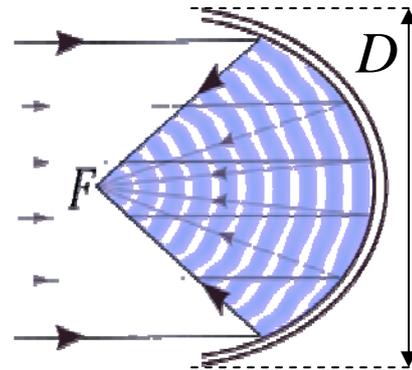
Para conocer el origen de interferencia realizaremos en el emplazamiento del radiotelescopio de la UV un estudio similar al realizado aquí, donde se plantearán dos posibles soluciones para acabar con dicha interferencia, una vez que sea debidamente identificada. A priori creemos que esta interferencia indeseada se debe a que *el tercer armónico de un canal analógico de TV emitido por Canal 9, se “cuela” por los lóbulos secundarios del patrón de radiación de la antena*. Midiendo la interferencia y observando su espectro esperamos identificar a qué tipo de servicio de Telecomunicaciones es debida, para posteriormente localizar la fuente que emite esta señal interferente. Probablemente la torre de emisión de Canal 9 de Burjassot sea la responsable de dicha señal, aunque también puede serlo cualquier estación base de telefonía móvil.

Una vez identificado el tipo de interferencia y su origen, propondremos dos posibles soluciones, que se comentan brevemente:

1) La primera solución consiste en *modificar el diagrama de radiación de la antena parabólica del radiotelescopio*, de forma que logremos disminuir el nivel de lóbulos secundarios. Para modificar el diagrama de radiación existen varias alternativas, entre las que destacamos las siguientes:

- 1.1- Modificar la geometría del reflector parabólico.
- 1.2- Modificar la geometría del alimentador (bocina).
- 1.3- Modificar la relación F/D

Las dos primeras alternativas son bastante complejas y costosas, ya que implicarían la construcción de un nuevo alimentador o de un nuevo reflector parabólico. Sin embargo, usando el mismo reflector y alimentador que ya tienen instalado, se puede modificar el diagrama de radiación simplemente modificando la posición de la bocina e el eje de la antena, estos es, variando la relación F/D (donde, F representa la distancia focal del paraboloide de revolución que actúa como reflector y D es el diámetro del mismo, tal y como se muestra en la figura de la derecha).



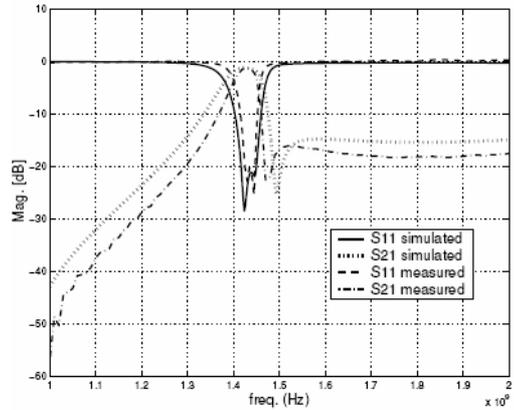
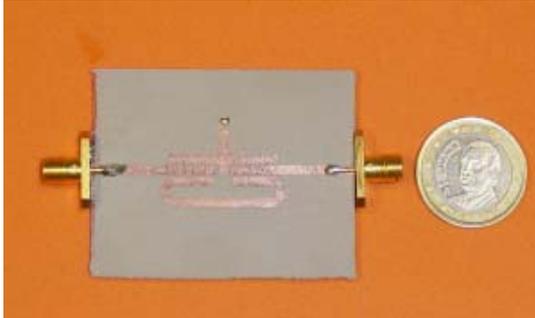
Con esta opción, se podría disminuir el nivel de lóbulos secundarios de la antena del radiotelescopio (y por tanto disminuir el nivel de la interferencia) simplemente acercando el alimentador al reflector (disminuyendo F). Sin embargo, hay que tener en cuenta que al variar el ratio F/D respecto de su valor óptimo (que supuestamente debe ser el que está siendo usado actualmente), la ganancia y la resolución de la antena disminuirán, empeorando las prestaciones del Radiotelescopio en su conjunto.

2) La segunda propuesta consiste en *colocar un filtro paso banda justo antes de la antena emisora de la señal interferente*. Este filtro paso banda debe estar sintonizado de manera que elimine armónico indeseado que está interfiriendo en la banda de 1420MHz, no afectando en absoluto a la correcta difusión de los canales de telecomunicaciones (que según el servicio estarán en una u otra banda de frecuencia, más o menos alejada de 1420MHz).

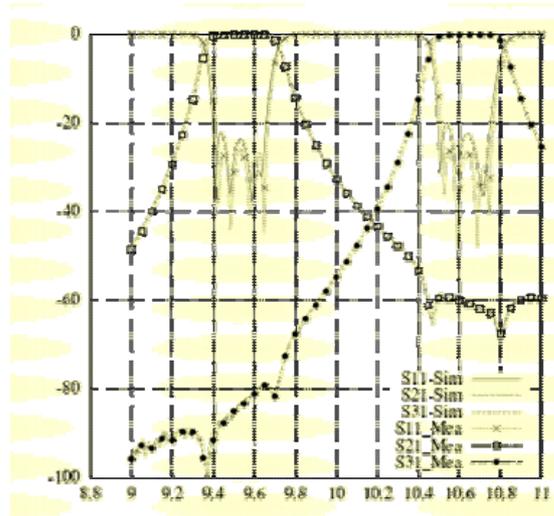
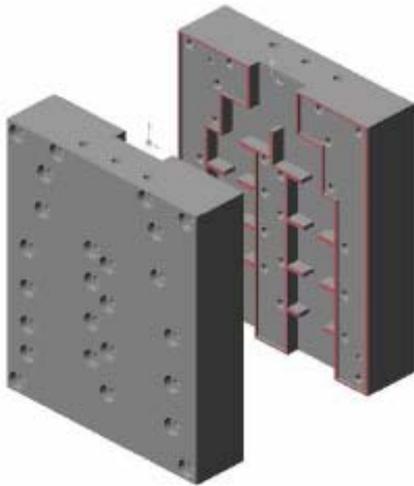
El grupo de investigación GEAT que está desarrollando el Radiotelescopio de la UPV, cuenta con una dilatada experiencia en análisis y diseño de filtros de radiocomunicaciones y microondas. Para poder diseñar el filtro deberemos conocer con exactitud la señal que está generando la interferencia, para así poder determinar el ancho de la banda de paso y las necesidades de atenuación en la banda que deseamos eliminar. Asimismo será necesario conocer la potencia con que se transmite dicha señal, para así escoger la tecnología de circuitos de microondas más adecuada de entre las siguientes opciones:

- 2.1- Filtros en tecnología *microstrip* (filtros encapsulados con resonadores impresos y sintetizando ceros de transmisión).
- 2.2- Filtros en tecnología guía de onda (cavidades resonantes con iris inductivos y/o capacitivos).
- 2.3- Filtros en tecnología coaxial (de tipo *comblin*, con cavidades resonantes con líneas coaxiales).

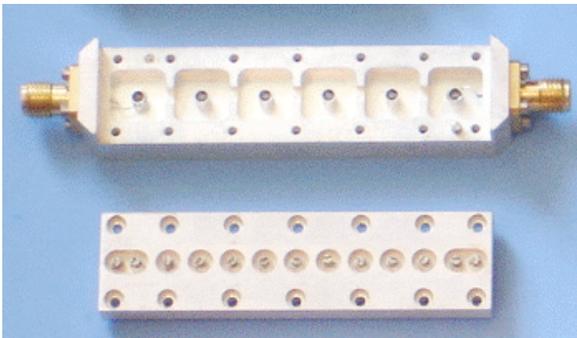
En las figuras de la página siguiente se pueden observar el aspecto y las respuesta eléctricas típicas en estas tres tecnologías de filtros de microondas (de arriba abajo, *microstrip*, guía de onda y por último tecnología *comblin*)



Filtros de microondas en tecnología microstrip con ceros de transmisión



Filtros de microondas en tecnología guía de onda



Filtros de microondas en tecnología *comblin*e

ANEXO 2.

Medida y Análisis de Interferencias en el Observatorio
Radioastronómico de la Universidad de Valencia.



Medida y Análisis de Interferencias en el Observatorio Radioastronómico de la Universidad de Valencia

Cartagena, 17 junio 2008

Elaborado por: *Jesús Mora Rodríguez,* e-mail: jemorobig@gmail.com
Marta Rodríguez García, e-mail: martarg9@hotmail.com
Alumnos de 5º curso de Ingeniería Superior de Telecomunicación

Supervisado por: *Dr. José Luis Gómez Tornero*
Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones
Dep. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena
e-mail: josel.gomez@upct.es teléfono: 968326531

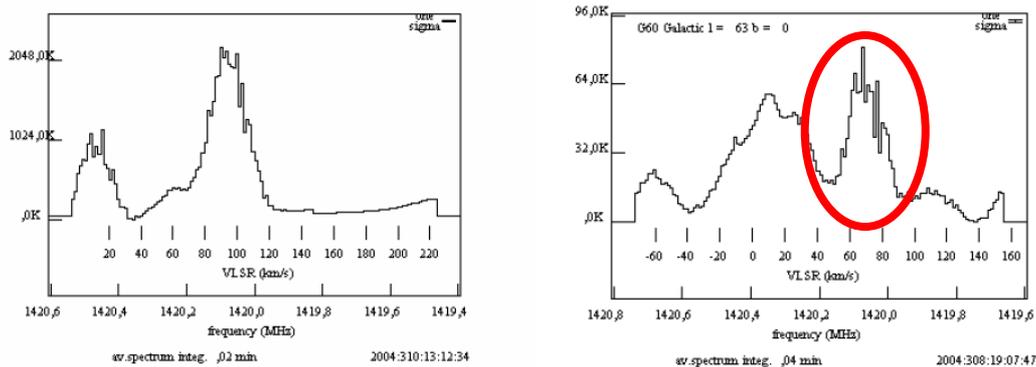
ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
2. MEDIDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	3
2.1 Equipos utilizados	3
2.2 Lugar donde se analizó el espectro electromagnético	5
2.3 Montajes	6
2.4 Parámetros del analizador de espectros	8
2.5 Servicios en la banda 500 –2300 Mhz	9
3. IDENTIFICACIÓN DE LA SEÑAL INTERFERENTE	9
3.1 Medida inicial con la antena bicónica	11
3.2 Medidas con la antena del Radiotelescopio	12
3.3 Conclusión final a partir de las medidas	18
4. POSIBLES SOLUCIONES A LA INTERFERENCIA	18

1. INTRODUCCIÓN

Este informe comprende el análisis de las interferencias detectadas en el estudio llevado a cabo en el observatorio radioastronómico de la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia (UV) los días 29 y 30 de mayo de 2008. Gracias a la colaboración de los compañeros de la UV, alumnos de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), dirigidos por el profesor Dr. José Luís Gómez Tornero, llevaron a cabo una serie de medidas del espectro radioeléctrico en la azotea de la Facultad de Físicas de la UV.

El objetivo de dicho estudio ha sido la detección e identificación de señales interferentes en la banda de observación del radiotelescopio de la UV, que es de 1420 MHz. Dichas señales dificultan la observación de la línea de HI, puesto que en la lectura del radiotelescopio, no sólo aparece la emisión detectada de la fuente observada, sino que también estarán presentes dichas señales interferentes. La siguiente figura ilustra este hecho.



Espectros de HI medidos con el radiotelescopio de la UV.

La primera figura representa el espectro de HI recibido sin interferencia, mientras que en la segunda se representa el espectro con interferencias, pudiendo observar un pico de radiación interferente (señalado con un círculo rojo), que modifica el perfil de HI esperado.

Para conocer el origen de la interferencia se llevó a cabo un estudio del espectro radioeléctrico similar al realizado en la azotea del edificio I+D+I de la UPCT. En el caso estudiado en el presente informe, aparte de realizar medidas en la azotea de la UV en un amplio rango del espectro radioeléctrico con la antena bicónica, se realizó también un estudio más próximo al escenario real de trabajo. Para ello se realizaron medidas del espectro empleando la propia antena receptora del radiotelescopio de la UV, como se describe a lo largo de este informe.

2. MEDIDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La finalidad de nuestro estudio es la de analizar el espectro radioeléctrico en el emplazamiento donde se encuentra situado el Radiotelescopio de la UV, de manera que podamos identificar la señal interferente indeseada que aparece en la banda de interés (en torno a 1420 MHz).

Seguidamente se describen los equipos que empleamos para la toma de medidas, el lugar donde se realizaron, el montaje de los equipos y las consideraciones que se han de tener en cuenta a la hora de realizar las medidas.

2.1 Equipos utilizados

- **Analizador de espectros y de redes** Rohde&Schwarz ZVL6, cuyo rango de frecuencias de trabajo es de: 9 kHz a 6GHz.



- **Ordenador portátil** Intel Core 2 Duo a 1,6 GHz , 1 GB de memoria RAM que permite la representación y análisis de las medidas.



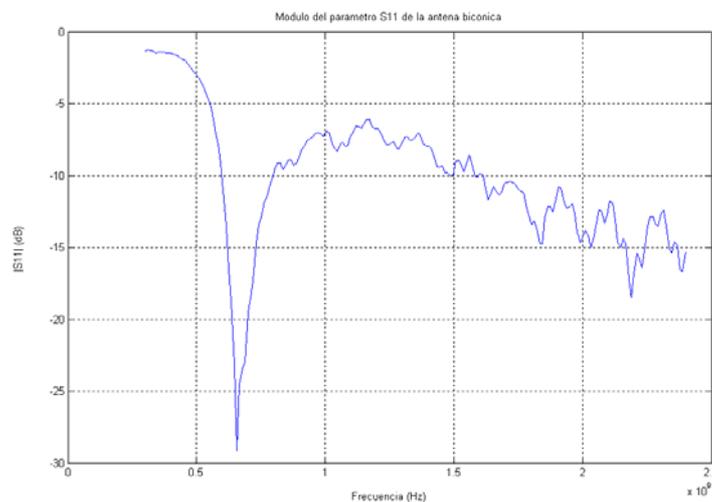
Para el análisis y representación de los datos obtenidos con el analizador de espectro se ha empleado el programa MATLAB versión 7.0.

- **Antena bicónica** de Schwarzbeck, cuyas características se exponen a continuación:

- Rango frecuencial de trabajo: 500-3000 MHz
- $P < 20W$
- Impedancia: 50Ω
- Su diagrama de radiación es casi omnidireccional, es decir, es capaz de recibir radiación desde cualquier dirección, de esta forma no es necesario realizar ningún apuntamiento de la misma.



Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la antena para el rango frecuencial citado, hemos medido su parámetro S_{11} , obteniendo los siguientes resultados.



Para la medida de dicho parámetro hemos empleado el analizador de redes. Como se puede comprobar la antena trabaja bien para el rango de frecuencias que queremos medir, 500-2300 Mhz, ya que el parámetro S_{11} (que representa la adaptación de la antena) ha de tener un valor bajo en ese rango (por debajo de $-8dB$), de manera que toda la potencia se radie y nada se refleje hacia el circuito al que esté conectada.

- **Cable coaxial** de altas prestaciones, bajas pérdidas y 50Ω de impedancia característica.
- Diversos **conectores y transiciones**.
- **Trípode** que da soporte a la antena.

2.2 Lugar donde se analizó el espectro electromagnético

Las medidas fueron realizadas en la azotea de la Facultad de Física de la UV, en Burjassot, Valencia. Mostramos un plano del callejero para situar el edificio:



Con el fin de ver la forma del edificio donde está emplazado el Radiotelescopio, adjuntamos la vista por satélite de la facultad de Física de la UV:



Finalmente adjuntamos la localización de la antena del Radiotelescopio de la UV. Como hemos adelantado en la introducción, realizamos dos tipos de medidas, una con la antena bicónica (punto verde en la imagen) y otra con la antena del radiotelescopio (punto azul en la imagen).



Como se puede observar en la imagen, la UV dispone de varios telescopios para la observación nocturna, un telescopio solar y el radiotelescopio. En nuestra visita pudimos observar que el aula de Astronomía constaba de dos instalaciones, una de ellas es un aula con ordenadores en red, donde se puede hacer tratamiento de imágenes obtenidas y una estación de observación, con una cúpula y diversos instrumentos complementarios como cámaras fotográficas, vídeo, espectrógrafo....

2.3 Montajes

Como ya hemos anticipado, hemos realizado dos tipos de montajes:

- 1) Con la antena bicónica: se conecta la antena bicónica al analizador de espectros a través del cable coaxial de altas prestaciones. La antena se coloca sobre un trípode que permite su ubicación en distintos puntos. La siguiente imagen ilustra el montaje.



Antena bicónica



Montaje: Analizador de Espectros, PC portátil y Antena bicónica

- 2) Con la antena del Radiotelescopio: se conecta la antena parabólica del radiotelescopio a través del cable coaxial de altas prestaciones. Cabe destacar, que este montaje tendrá distintas variantes, ya que para poder identificar la interferencia, realizamos medidas en distintas etapas del sistema antena-receptor tal y como se describirá a lo largo de esta memoria. Se emplearán distintos conectores que permitirán visualizar con el analizador los espectros en las diferentes etapas del sistema. Las siguientes imágenes ilustran el montaje.



Antena Radiotelescopio



Montaje: Antena Radiotelescopio y Analizador de espectros

2.4 Parámetros del analizador de espectros

A la hora de la toma de medidas con el analizador de espectros, es muy importante tener en cuenta una serie de parámetros que marcarán la calidad de las mismas. Por un lado, se ha de tener en cuenta el ancho de banda de resolución (RBW), que determina la separación frecuencial de dos muestras adyacentes (nuestro analizador permite un RBW mínimo de 300 Hz).

Por otro lado, se tiene el ancho del espectro a analizar (SPAN), nuestro analizador permite trabajar en un rango de 9KHz a 6GHz. Si se quiere realizar medidas con una gran resolución, en las que sea posible discernir estrechas emisiones, es necesario emplear un RBW pequeño. En contraparte, elegir un RBW pequeño supone un elevado tiempo de procesado, por lo que existe un férreo compromiso entre tiempo de procesado y resolución de las medidas. A la hora de identificar la señal interferente empleamos un RBW pequeño ya que el ancho de ésta es muy pequeño.

Además, se ha de tener en cuenta que los ficheros de salida del analizador contienen un número finito de muestras, por lo que si se elige un SPABN demasiado grande, la resolución de la medida no vendrá dada por el RBW, sino por el cociente entre el SPAN y el número de muestras del fichero de salida. Por lo tanto, para obtener una fina resolución, se ha llevado a cabo un eventanado del espectro, es decir, se ha ido analizando “a trozos”, empleando pequeños SPAN de 200MHz con un RBW de 10KHz.



2.5 Servicios en la banda 500 –2300 Mhz

A continuación se detallan algunos de los servicios que encontraremos en la banda analizada, con su correspondiente ancho de banda, y el tipo de modulación y multiplexación empleada.

Servicio	Banda de frecuencia (MHz)	Ancho de banda del canal	Modulación	Multiplexación
TV analógica	470/830	8 MHz	Video AM Audio FM	FDMA
TDT	830/862	8 MHz	64-QAM	OFDMA
TETRA	916/921	25 kHz	DQPSK	TDMA
GSM-900	925/960	200 kHz	GMSK	TDMA
GSM-1800	1805/1880	200 kHz	GMSK	TDMA
UMTS	2110/2200	5 MHz	H-QPSK	WCDMA

Para asegurar la representación de los canales de todos los servicios vistos en la tabla anterior, empleamos un RBW de 10KHz.

3. IDENTIFICACIÓN DE LA SEÑAL INTERFERENTE

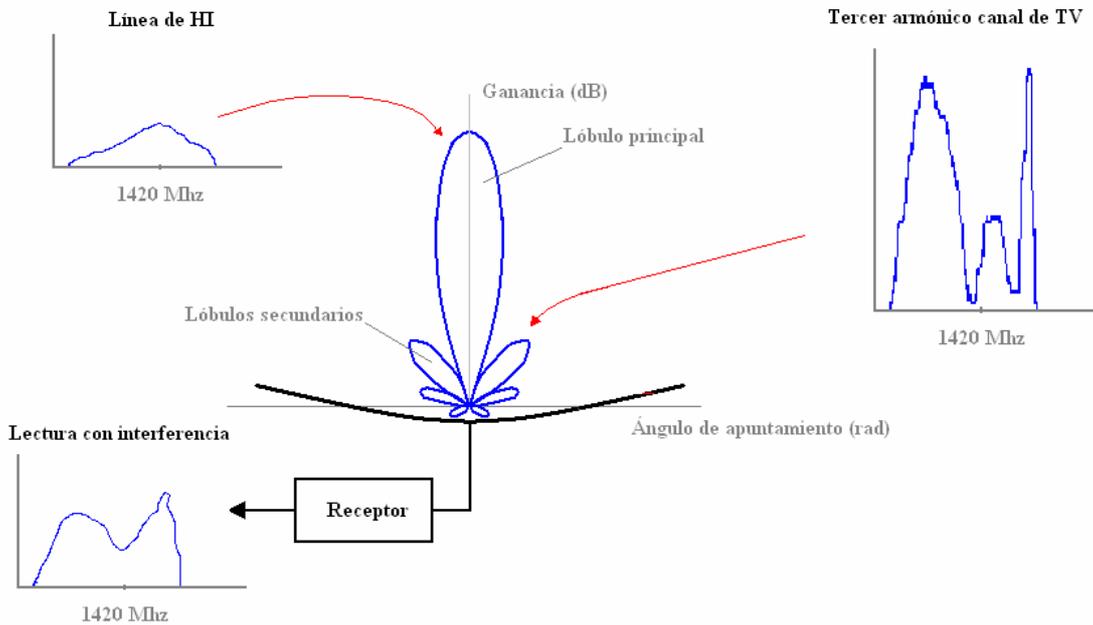
En anteriores visitas al observatorio de la UV, fuimos informados de la existencia de estas interferencias, lo que hizo que empezáramos a pensar cual podría ser el origen de las señales interferentes.

En una primera instancia, se pensó que podría proceder de la torre de radiodifusión de Canal 9, que se sitúa a apenas un centenar de metros del radiotelescopio. En concreto, se creía que se debía a que el tercer armónico de un canal analógico de TV, tras difractar en los bordes del reflector, se “colaba” por los lóbulos secundarios de la antena.

Esta primera hipótesis parecía plausible, pues el tercer armónico de un canal de TV que interfiera en la banda de 1420 Mhz, sería el correspondiente a un canal que se emitiera a 473.3 Mhz, que se encuentra al principio de la banda de frecuencias utilizada para la radiodifusión de TV analógica.

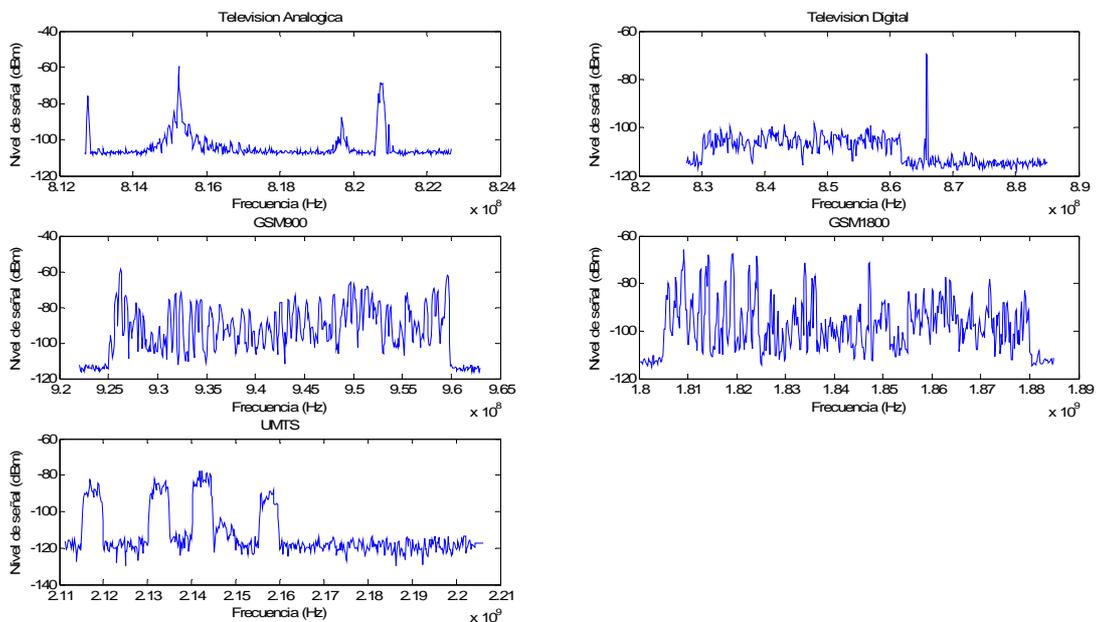
Además, puesto que la potencia de emisión de los canales de TV es mucho mayor que la recibida del espacio, la interferencia se podría “colar” por los lóbulos secundarios del patrón de radiación¹ de la antena, pues el nivel de interferencia era comparable al nivel de emisión HI medido. La siguiente imagen ilustra éste hecho.

¹ Patrón de radiación: Representa la ganancia de una antena en función del ángulo de apuntamiento. Para realizar una correcta observación se ha de apuntar a la fuente con la dirección de máxima ganancia (lóbulo principal).



Primera hipótesis de interferencia

En caso de estar en lo cierto, con la antena bicónica, podríamos detectar la interferencia, por lo que intentamos buscar espectros característicos de señal de TV en la banda de 1420 Mhz. La siguiente imagen muestra los espectros característicos de los diferentes servicios que trabajan en las frecuencias estudiadas.



Espectros de diferentes servicios



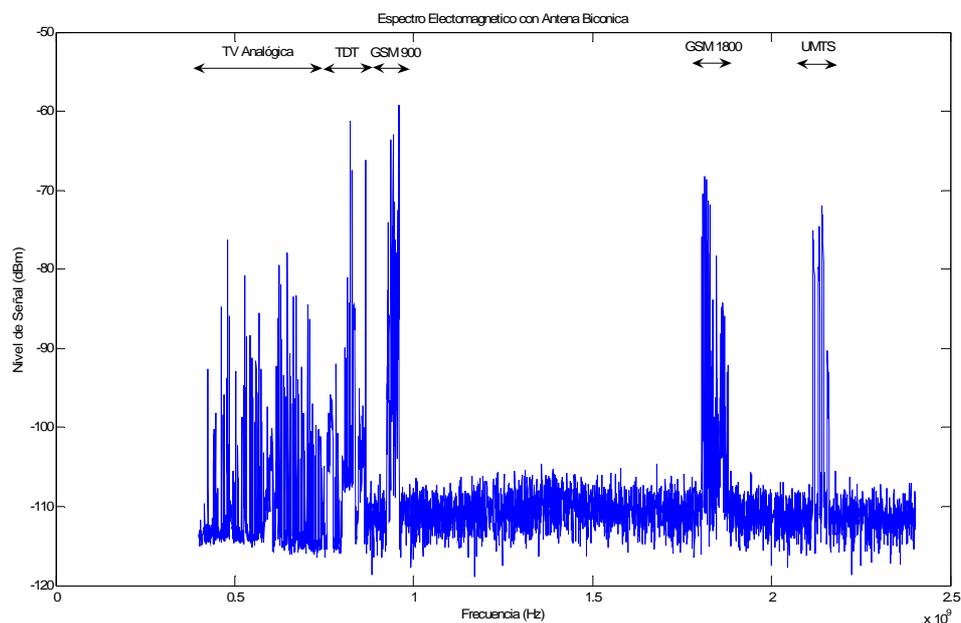
El analizador de espectros permite exportar ficheros ASCII que contienen los datos medidos. Posteriormente, estos datos son manipulados y procesados con Matlab. Como se adelantó, tomamos medidas de dos formas diferentes, una con la antena bicónica y otra con la propia antena del radiotelescopio.

El análisis del espectro inicial con la antena bicónica se realizó empleando un SPAN de 200MHz. De este modo, puesto que barremos de los 400MHz hasta los 2400MHz, obtenemos 10 ficheros distintos. De esta forma, con el programa Matlab, podemos obtener una representación del espectro radioeléctrico en el entorno del Radiotelescopio entre 400MHz y 2400MHz. También se analizará el espectro con una fina resolución en la banda de interés, 1420MHz, con el fin de poder detectar la señal interferente.

Seguidamente se procede a realizar un estudio similar con la antena del radiotelescopio. Más adelante mostraremos los pasos a seguir y los distintos tipos de medidas realizados para la identificación de la señal interferente y de la fuente que la origina.

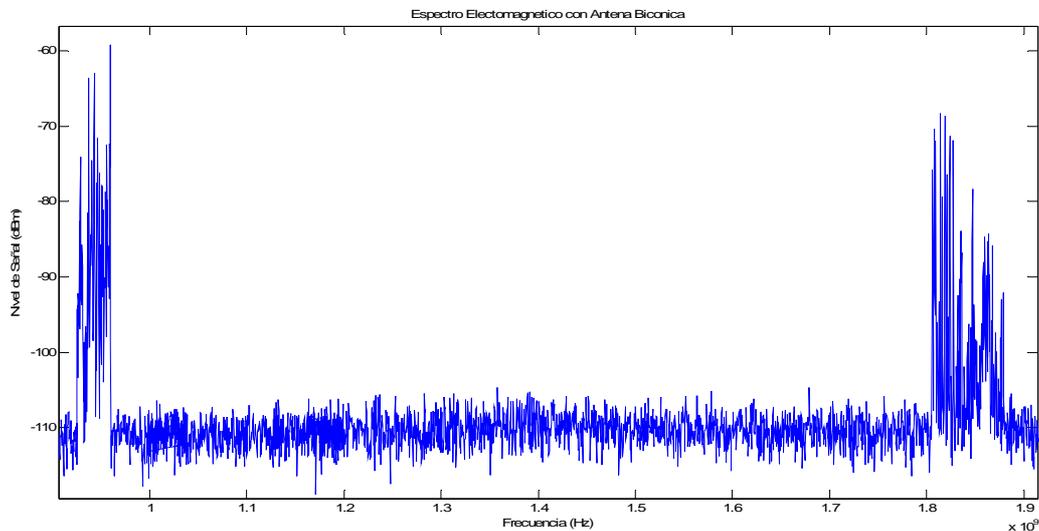
3.1 Medida inicial con la antena bicónica

Primeramente, se representa el espectro total desde 400 Mhz hasta 2400 Mhz.



Se puede observar que entre 1000 Mhz y 1700 MHz el espectro está “limpio de señales”, por lo que con la antena bicónica no detectamos la señal interferente.

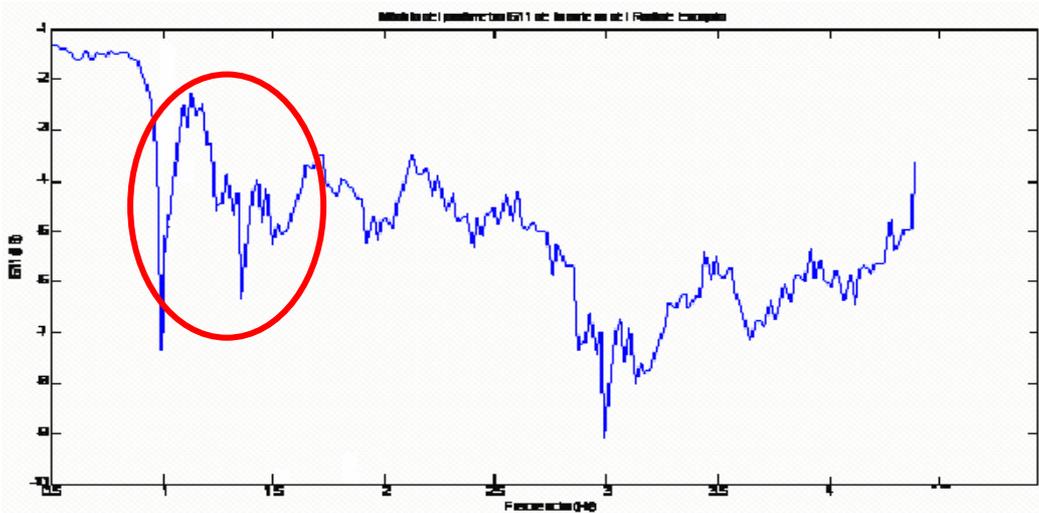
La siguiente imagen corrobora lo anterior.



Aparentemente la banda de interés se encontraba libre de interferencia, o al menos no éramos capaz de detectarlas con la antena biconica. Éste hecho tiraba para atrás nuestra primera hipótesis sobre cual podría ser la fuente interferente ya que no observábamos ninguna interferencia que estuviera presente en el canal radio que rodea al Radiotelescopio, de modo que optamos por pasar a realizar medidas utilizando la antena misma del radiotelescopio para intentar descubrir en qué punto aparecía la interferencia indeseada.

3.2 Medidas con la antena del Radiotelescopio

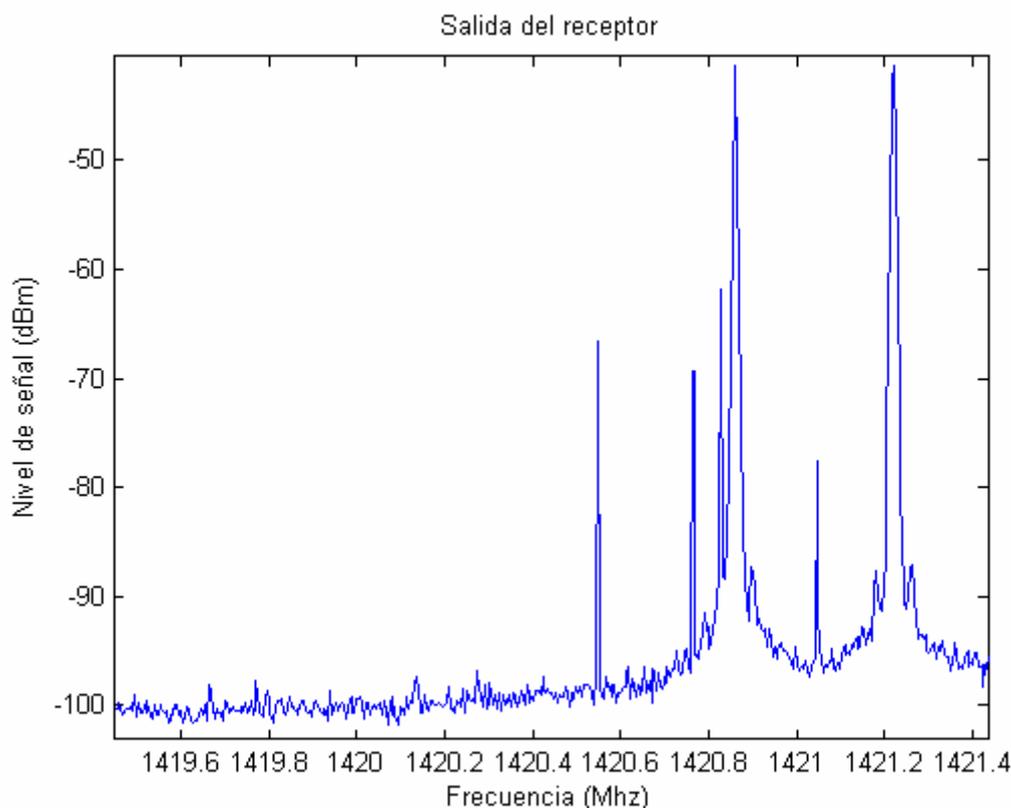
Con el fin de comprobar el buen funcionamiento de la antena del Radiotelescopio en la banda de frecuencia de trabajo, vamos a emplear el analizador de redes para medir su parámetro S11.



Se puede observar que a 1420MHz tenemos un valor del parámetro S_{11} de aproximadamente -4.5dB , por lo que la antena parabólica no está funcionando demasiado bien a la frecuencia de trabajo, observando además que presenta una mejor adaptación a frecuencias en torno a 3GHz, donde el valor de su parámetro S_{11} se reduce a -9dB .

1) Primera medida

La primera medida realizada con la antena del Radiotelescopio fue conectando el analizador de espectro tras el receptor, es decir, teniendo en cuenta la ganancia del LNA (Low Noise Amplifier), la ganancia del receptor y la bajada en frecuencia. A continuación mostramos la medida tomada.



En la gráfica anterior que, ha sido tomada empleando el modo de medición Max Hold On^2 , los picos de mayor amplitud corresponden con la señal del oscilador y los de menor amplitud de deben a productos de intermodulación producidos en el mezclador. Para dar explicación a la gráfica anterior, vamos a realizar un sencillo estudio del receptor, cuyo diagrama de bloques se muestra a continuación.

² Este modo de medición hace que solo se actualice la lectura si el valor de la nueva muestra es mayor que las anteriores, de este modo, al final de la medición se obtiene el espectro con los mayores valores de amplitud medidos.

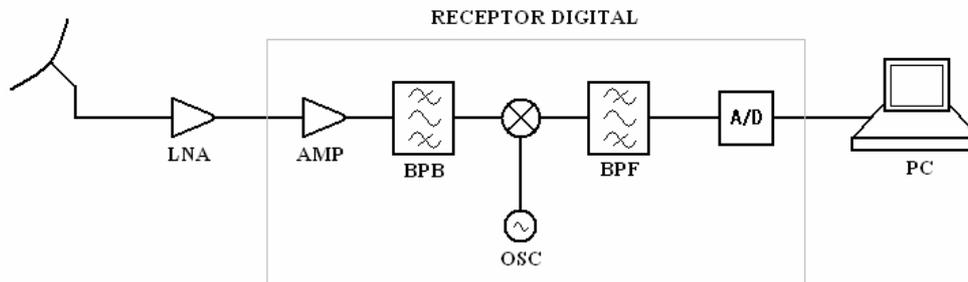


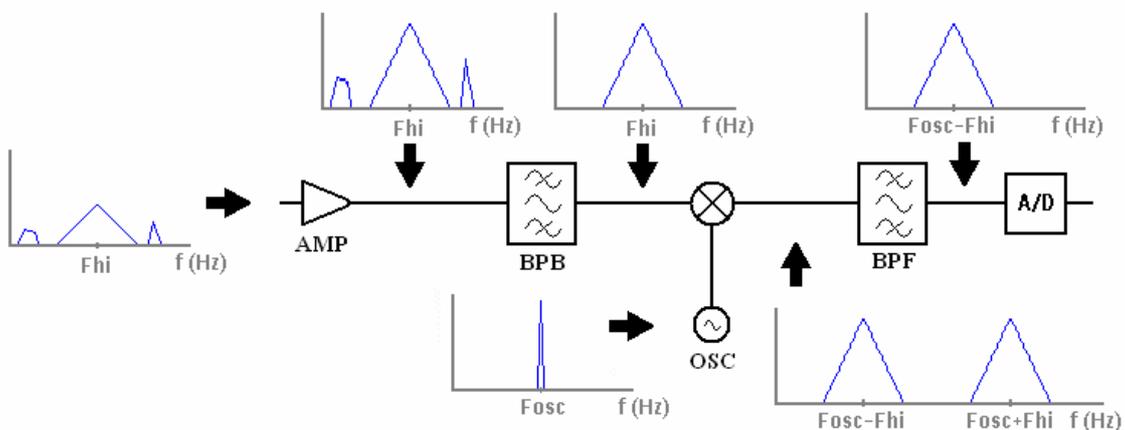
Diagrama de bloques del receptor del radiotelescopio de la UV

La señal recibida por la antena es amplificada por el LNA, posteriormente se vuelve a amplificar en el receptor y se realiza un filtrado Paso-Banda para quedarnos con las frecuencias de interés, en torno a 1420MHz.

Tras el mezclador, aparecen réplicas del espectro de entrada situadas en $f_b = f_{osc} - 1420\text{MHz}$ y $f_a = f_{osc} + 1420\text{MHz}$. Con el posterior filtrado Paso-Banda nos quedamos con la réplica de menor frecuencia, por lo que el BPF (Band Pass Filter) ha de estar sintonizado a f_b . Es interesante quedarnos con la réplica de menor frecuencia por varios motivos:

1. Al tener una señal de menor frecuencia, será más sencilla su conversión Analógico-Digital, por lo que la implementación del convertor A/D que sigue al BPF será más sencilla, teniendo un coste menor.
2. Además, la atenuación que sufre una señal al ser transmitida por un determinado medio, es mayor cuanto mayor es su frecuencia, así, al quedarnos con la réplica de menor frecuencia, la señal resultante sufrirá menos atenuación al ser transmitida por el cable.

La siguiente imagen muestra los espectros de la señal recibida en los distintos puntos del procesado.



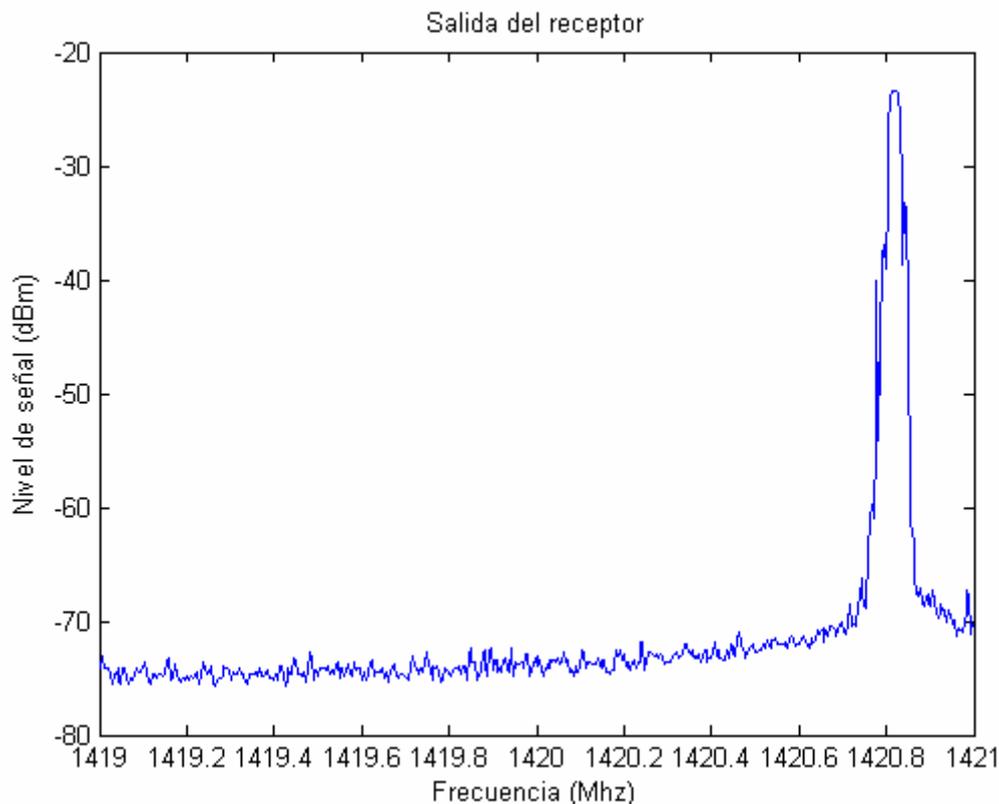
Evolución del espectro recibido a lo largo del receptor



El hecho de que a la salida del receptor se obtenga la señal mostrada anteriormente, nos hace pensar varias cosas:

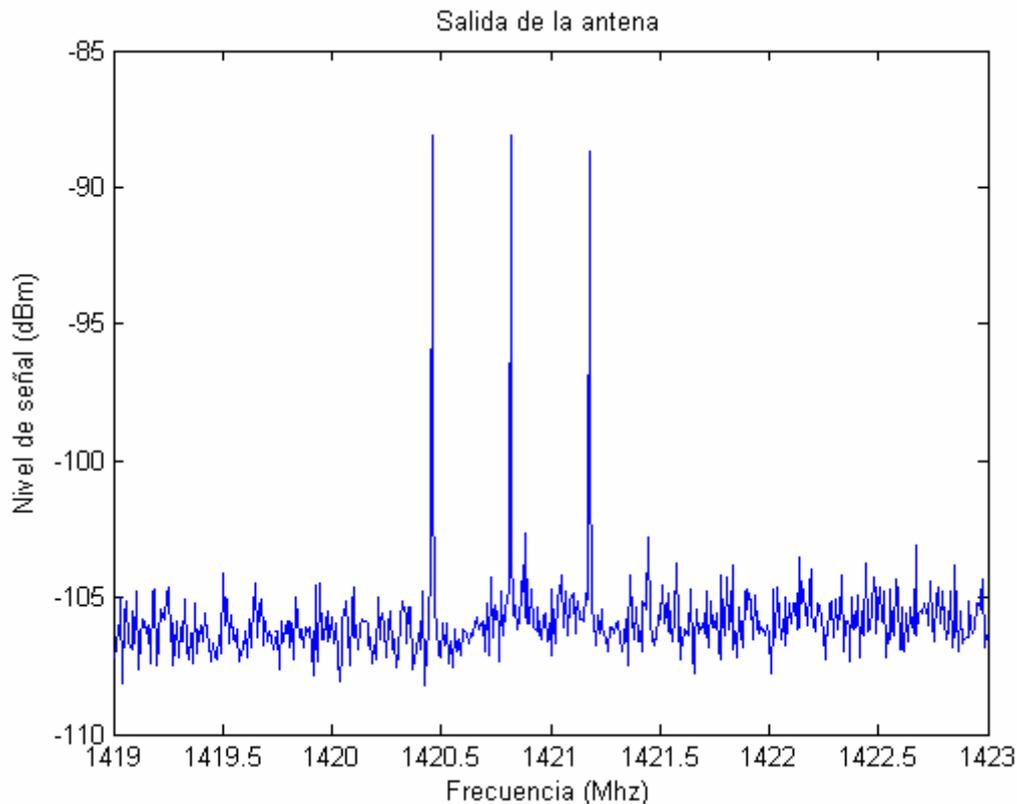
1. El BPF que sigue al mezclador no funciona correctamente, pues a esas frecuencias no debería aparecer nada, dado que solo debería dejar pasar las frecuencias en la banda de fb.
2. El que aparezcan dos picos de mayor amplitud se debe a que la frecuencia del oscilador varía con el tiempo. Esto es debido a derivas térmicas que se producen cuando se hace funcionar al oscilador (en este caso se trata de un VCO, “*Voltage Controlled Oscillator*”) fuera de su punto de reposo. Éste hecho es muy perjudicial a la hora de realizar medidas con el Radiotelescopio, como se explicará en el siguiente apartado.

Con esta medida sacamos como conclusión que el receptor no funciona correctamente. No obstante, con esta medida aún no se puede deducir de donde procede la interferencia que dificulta las observaciones de HI de nuestros compañeros de la UV. La siguiente imagen muestra otra medida tomada tras el receptor en ausencia de señal de HI. Como se observa, vuelve a aparecer la señal del oscilador.



2) Segunda medida

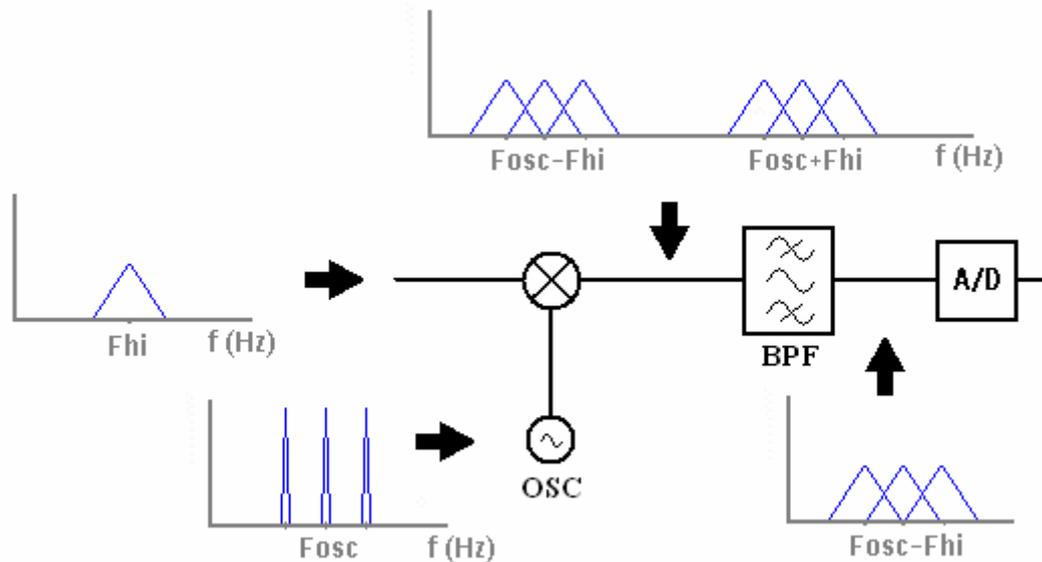
Esta segunda medida la realizamos conectando el analizador directamente tras la bocina de la antena, mientras ésta no apunta a “ninguna” fuente. La medida obtenida es la siguiente.



La anterior gráfica nos dejó claro cuál era el origen de la interferencia que buscábamos, se trata de una **interferencia producida por el propio receptor**. Lo que aparece en la gráfica **no es otra cosa que la señal del oscilador que se cuela en la bocina de la antena**. Además, se pueden apreciar las derivas térmicas que antes se explicaron y el efecto de los amplificadores que aumentan el nivel de señal.

Encendiendo y apagando el receptor pudimos comprobar como, efectivamente, la interferencia que se tenía era introducida por el propio receptor. Esto es nefasto, pues la antena está recibiendo una fuerte señal justo en las frecuencias que se quieren recibir. De este modo, **la lectura del radiotelescopio será una combinación de la radiación de la fuente observada y la propia señal del oscilador**.

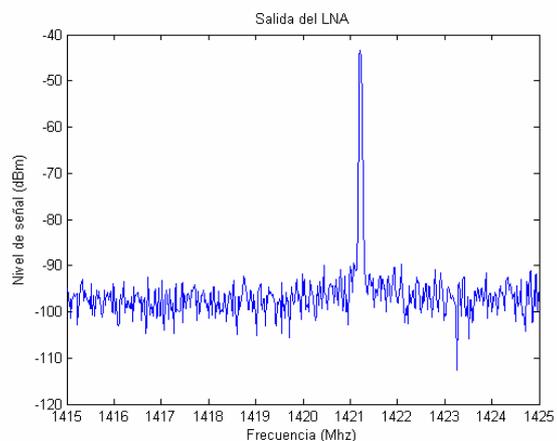
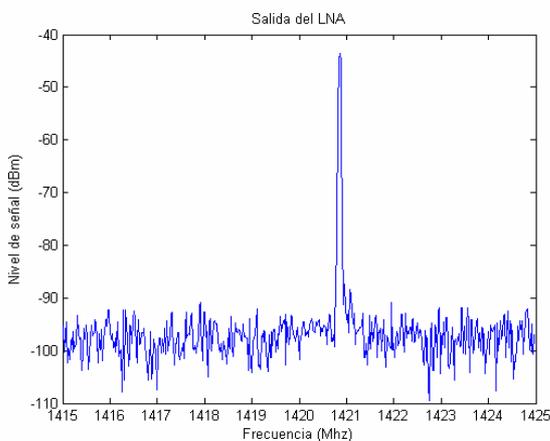
El efecto de las derivas térmicas que sufre el oscilador, como se adelantó, es algo muy perjudicial. Al tener diferentes frecuencias, se obtendrán réplicas que se solaparán, haciendo que el espectro promedio que se muestra en el programa de adquisición de datos poco se parezca al verdadero espectro observado. La siguiente imagen trata de explicar este hecho.



Efecto en el mezclado de las derivas térmicas sufridas en el oscilador

3) Tercera medida

La tercera medida se realizó conectando el analizador tras el LNA (Amplificador de bajo ruido). De éste modo, el espectro recibido a de ser similar al que se tiene al medir directamente tras la antena, pero con un mayor nivel de señal a ruido. Merece la pena mencionar que para realizar esta medida fue necesario el empleo de adaptadores capacitivos en T, que permitieran polarizar los transistores del LNA evitando que la corriente continua de polarización se colara al analizador de espectros, lo cual sería nefasto tanto para el LNA como para el analizador de espectros.





3.3 Conclusión final a partir de las medidas

Tras estudiar las medidas obtenidas se corrobora que la interferencia que dificulta las observaciones con el radiotelescopio se debe a que **el propio receptor radia la señal del oscilador local** (lo cual se conoce como **pérdidas o “leakage” del oscilador local**), y esta señal del oscilador local es captada por la antena. Cuando el oscilador tiene un frecuencia cercana a 1420MHz afecta muy negativamente a la medida.

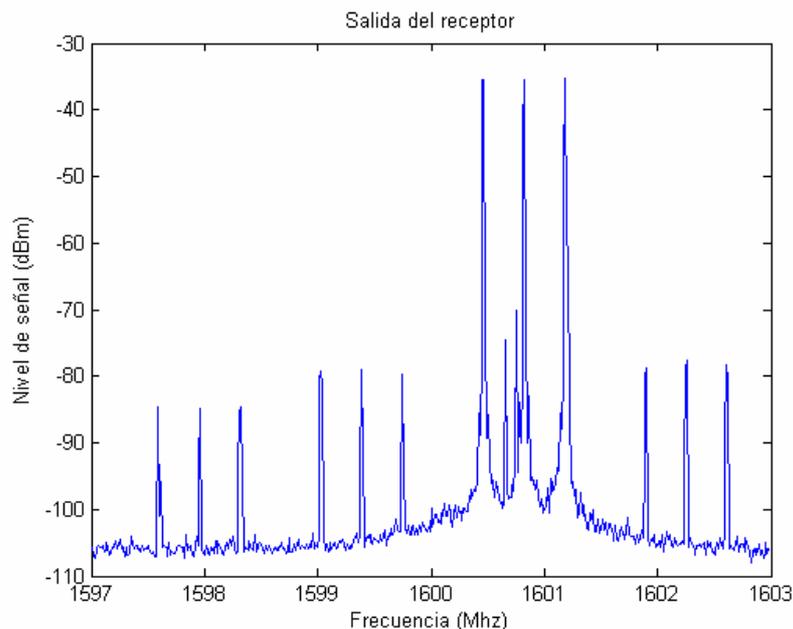
También ocurre que cuando se saca al oscilador de su punto de reposo se producen derivas térmicas haciendo que la frecuencia de oscilación varíe con el tiempo, a la vez que aparecen espurios.

4. POSIBLES SOLUCIONES A LA INTERFERENCIA

En este apartado se barajan algunas posibilidades que pueden paliar el efecto indeseado de la interferencia detectada.

1. **Seleccionar en el programa de adquisición una frecuencia del oscilador alejada de las frecuencias de emisión de HI (1420MHz).** Ésta solución presenta como inconveniente que al hacer trabajar al oscilador fuera de su frecuencia de reposo, su comportamiento empeora, apareciendo espurios y las ya mencionadas derivas térmicas.

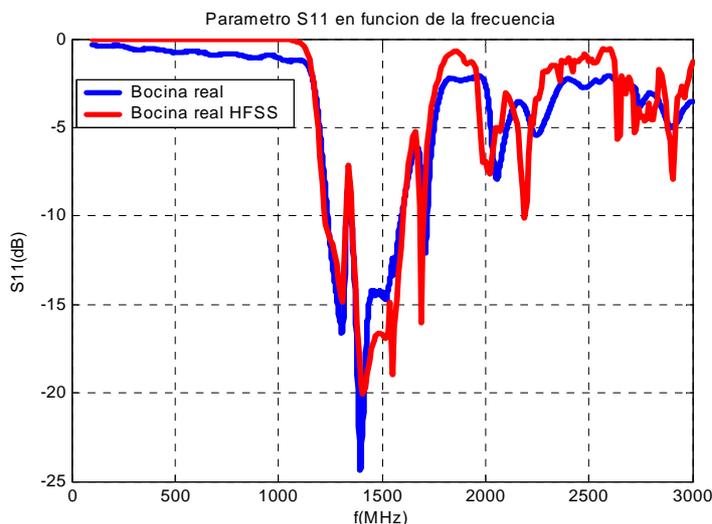
La siguiente figura muestra el comportamiento del oscilador cuando se selecciona una frecuencia de oscilador en torno a los 1600MHz.



Vemos que emplear una frecuencia del oscilador de 1600MHz haría que los resultados obtenidos tampoco fueran correctos, pues aumenta el nivel de armónicos y productos de intermodulación, que aumentarán la probabilidad de interferencias indeseadas. Es **preferible emplear una frecuencia del oscilador menor que la de HI, por ejemplo 1380MHz**, dado que este valor se encuentra más próximo a la frecuencia de oscilación de reposo del VCO, con lo que se reducirán los espurios y las derivas térmicas. No obstante, el receptor seguirá radiando la señal del oscilador, pero en este caso no caerá “encima” de las frecuencias de HI, siendo mejores los resultados obtenidos.

- 2. Alejar el receptor (que contiene al oscilador local) de la antena y aumentar su apantallamiento para evitar el anteriormente mencionado fenómeno de “leakage” o radiación indeseada.** Para esto sería necesario colocar una serie de LNAs tras la bocina que amplificaran la señal recibida y de este modo se pudiera transmitir por un cable coaxial hacia un lugar alejado donde se situaría el receptor, sin miedo a que la atenuación introducida por éste empeorara significativamente la señal recibida. A estos LNAs que compensan el efecto de los cables de bajada desde la bocina hasta el receptor se les conoce como “*line amplifiers*”.

Para la puesta en marcha del radiotelescopio de la UPCT se han comprado unos LNAs comerciales que tiene un buen comportamiento para trabajar a las frecuencias de emisión de HI. Éstos LNAs pueden verse en <http://www.radioastronomysupplies.com/>.



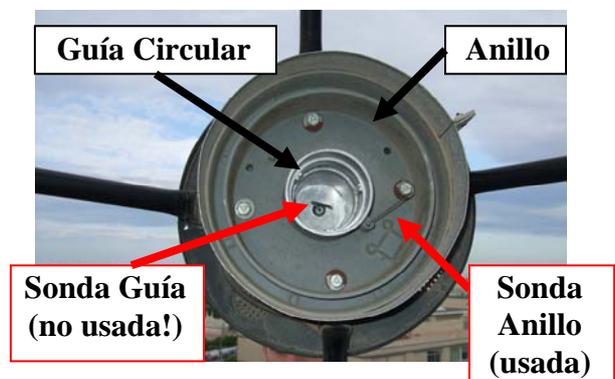
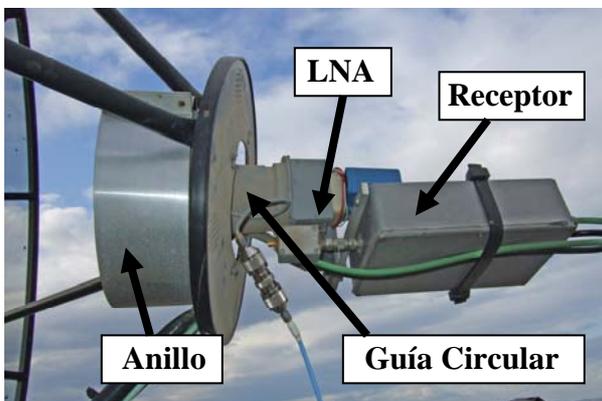
Bocina optimizada para una antena parabólica de $\phi=5m$ $f/D=0.3$, fabricada y medida en la UPCT

- 3. Otro aspecto mejorable que se ha observado en estas medidas es la mala adaptación de la antena parabólica.** Como se mostró en el apartado 3.2, el nivel de adaptación está en torno a $S_{11} \approx -5dB$, lo cual dista bastante de los $-10dB$

mínimos recomendables para estas aplicaciones. Un PFC (proyecto fin de carrera) desarrollado en al UPCT se centró en el análisis y diseño de una bocina para la antena parabólica de este tipo de SRT (“Small RadioTelescope”), consiguiendo una adaptación por debajo de -15dB, tal y como se muestra en la figura de la página anterior, donde se comparan simulaciones con medidas reales del S_{11} en función de la frecuencia, y realizadas en los laboratorios de la UPCT. También se muestra en una fotografía la bocina fabricada, que se basa en una guía circular y un anillo resonante para adaptar dicha bocina a la superficie del reflector parabólico y así optimizar la eficiencia de la antena del Radiotelescopio.



**Bocina +
Receptor en
el Foco de la
Parábola**





Observando la bocina del Radiotelescopio de la UV pudimos comprobar que la alimentación de dicha bocina dista mucho de ser la óptima. En concreto, y tal y como se puede ver en las fotografías de la página anterior, se observó que no se estaba alimentando la bocina apropiadamente, ya que la sonda de la guía circular estaba inutilizada. Por el contrario, se estaba usando una sonda coaxial en forma de monopolo, que excita directamente el anillo resonante. Creemos que esta solución no es la óptima, ya que se pierde la mejor adaptación que se conseguiría si se excitara la guía circular de la bocina, la cual a su vez excitaría después el anillo externo. Es por tanto este otro punto mejorable, y en el cual los investigadores de la UPCT desean colaborar (junto con los anteriormente descritos) para mejora las prestaciones del Radiotelescopio de la UV.

Cartagena, a 17 de Junio de 2008

ANEXO 3.

Factura de compra en RF HAMDESIGN.

RF HAMDESIGN

Weversburen 5
 NL-9201 EG Drachten
 The Netherlands

e-mail : info@rfhamdesign.com
 internet : www.rfhamdesign.com

RF HAMDESIGN

Mechanical Ham Radio Equipment



Tel: +31 (0) 6 50 882 889
 Fax: +31 (0) 8 47 187 776
 VAT nr : NL 1071 21 724 B01
 ABN/AMRO Drachten: 43.48.01.305
 IBAN: NL49 ABNA 0434 8013 05
 Swift/Bic-code: ABNANL2A

Universidad Politécnica de Cartagena
 José Luis Gómez Tornero, ETSIT,
 Dpto.TIC
 Muralla del Mar s/n
 C.P. 30202 CARTAGENA
 SPAIN

INVOICE

Account No: 103890	Invoice No: 20050490	Date: 19-07-2008
--------------------	----------------------	------------------

Your VAT number: ES Q8050013E

Code	Description	Quantity	Unit price	Disc. %	VALUE
<i>Opdracht: 20080116, 18-06-2008,</i>					
FPD3MOKIT	Mesh dish kit 3 meter diameter	1	1.089,08	0,00%	1.089,08
ALPHA-BIGRAS	Alpha Spid AZ & EL antenna rotator (type BIG-RAS) complete	1	1.217,65	0,00%	1.217,65
FPD-BR01	Alpha Spid BIG RAS Rotator <> Dish mounting bracket	1	100,84	0,00%	100,84
FPFHORN23	Horn dish feed 1420MHz linear F/D=0.40	1	119,00	0,00%	119,00
PARTS	Horn clamp feed 1420MHz	1	29,00	0,00%	29,00
PARTS	LHCP Helix dish feed 1420MHz inc. clamp	1	129,00	0,00%	129,00
PW320W27	Power supply 27V / 11,7 Amp, module style, prof. line	2	149,00	0,00%	298,00
PARTS	Reel of 50 meter control cable / 4*1.5mm2	2	69,00	0,00%	138,00
FREIGHT	Freight Charges / Handling / Package	1	378,40	0,00%	378,40
INSUREMENT	Insurement, 1,% of total invoice	1	34,98	0,00%	34,98

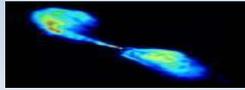
Total amount nett	%VAT	Amount VAT	Val	TOTAL
3.533,95	0,00%		EUR	3.533,95

Writtin in at the Chamber of Commerce in Leeuwarden, the Netherlands No: 01107005

Terms of payment:
 Many thanks for your payment

ANEXO 4.

Factura de compra en Radio Astronomy Supplies
(RAS).



REQUESTED QUOTE

Radio Astronomy Supplies

International Supplier of Quality Radio Telescopes and Associated Items - Since 1995

QUOTE # 050408
DATE: MAY 6, 2008

P.O. Box 450546
Sunrise, FL 33345
954 554-3739
jmlras@mindspring.com

SUPPLIER See Above

QUOTE TO: CIF (Q8050013-E)
"Jose Luis GÃ³mez Tornero"
University of Cartagena,
Antiguo Cuartel de Antigones.
Plaza del Hospital, 1.Campus
Muralla del Mar (30202)
Cartagena, Murcia, Spain

SALESPERSON	JOB	SHIPPING METHOD	SHIPPING TERMS	DELIVERY DATE	PAYMENT TERMS	DUE DATE
J. Lichtman		FEDEX	-	Approx 4 Weeks from order date.	Pre-Paid / Wire Transfer	TBD

ITEM #	QTY	DESCRIPTION	UNIT PRICE	* DISCOUNT	LINE TOTAL
1	1	1420 MHz. SpectraCyber Spectrometer	\$2695.00	\$100.00	\$2595.00
2	8	RAS 1420 MHz Low Noise Amplifier	\$150.00	\$80.00	\$1120.00
3	2	RAS 1420 MHz, 1- Pole Bandpass Filter	\$115.00	\$20.00	\$210.00
4	2	RAS 1420 MHz Multi-Element Hydrogen Line Filter	\$135.00	\$10.00	\$260.00
5	2	RAS Cool-Temp LNA TE	\$365.00	\$25.00	\$705.00
6	1	1420 MHZ. Calibrated Noise Source	\$95.00	\$5.00	\$90.00
		<u>Included -</u>		<u>Sub Total</u>	<u>\$4980.00</u>
		1- Feedhorn, Item 1, 1 LNA, Item 1	\$0.00		\$0.00
		100 Feet of Coax, Item 1	\$0.00		\$0.00
		Software, Engineering Support, Item 1	\$0.00		\$0.00
		2 - Free Radio Astronomy Supply Shirts	\$0.00		\$0.00
		2 - Free Radio Astronomy CDs	\$0.00		\$0.00
		Fedex SHIPPING			\$394.00
			TOTAL DISCOUNT	\$240.00	\$5374.00
				SALES TAX	\$0.00
				TOTAL	\$5374.00

* Educational Discount Applied

Item 5 - CRYO Unit has been discontinued, Replacing with TE Unit. Price difference is less.

BANK ACCOUNT WIRE TRANSFER INFORMATION -

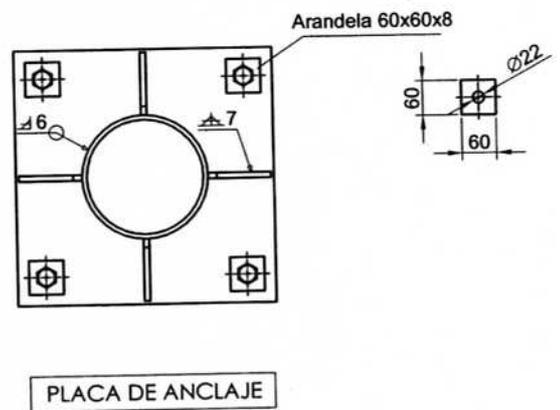
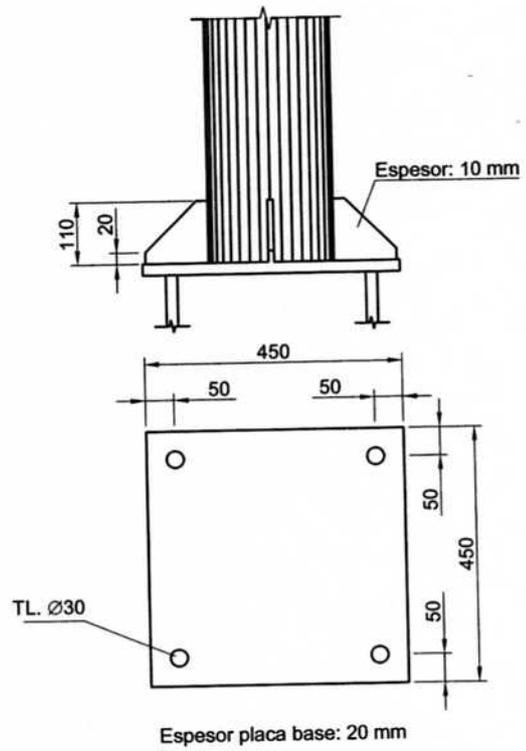
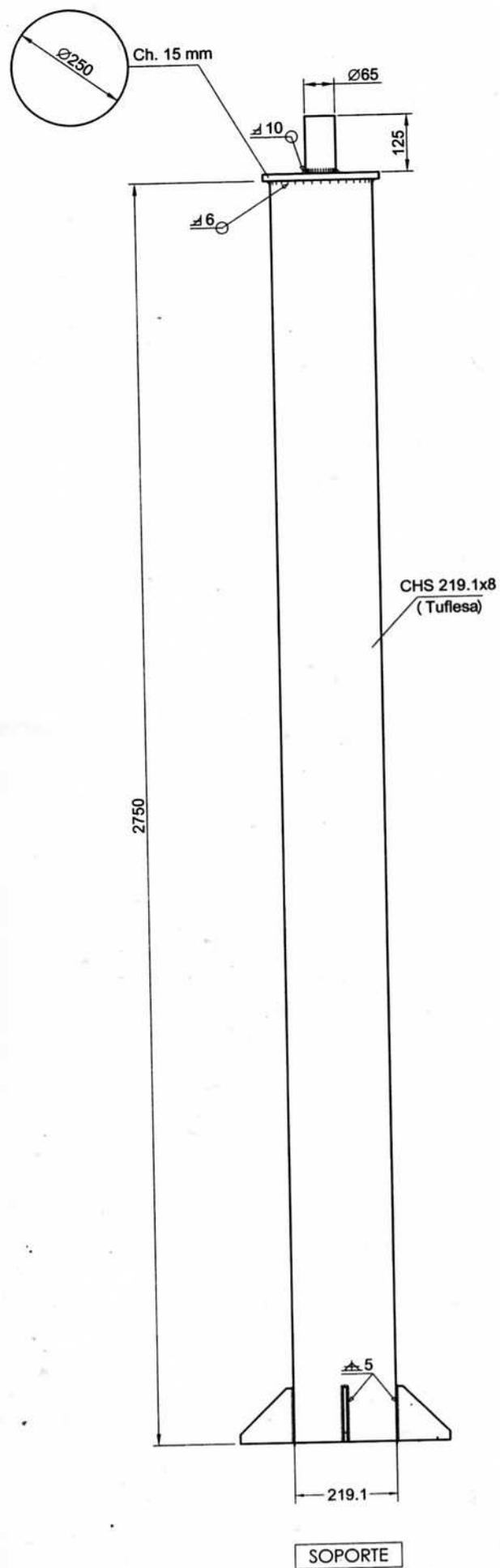
BANK ATLANTIC - SWIFT CODE: BKATUS3F, ROUTING NO: 267083763, ACCOUNT NO: 0065040832

Make all checks payable to: Radio Astronomy Supplies or PayPal / Wire Transfer

THANK YOU FOR YOUR BUSINESS

ANEXO 5.

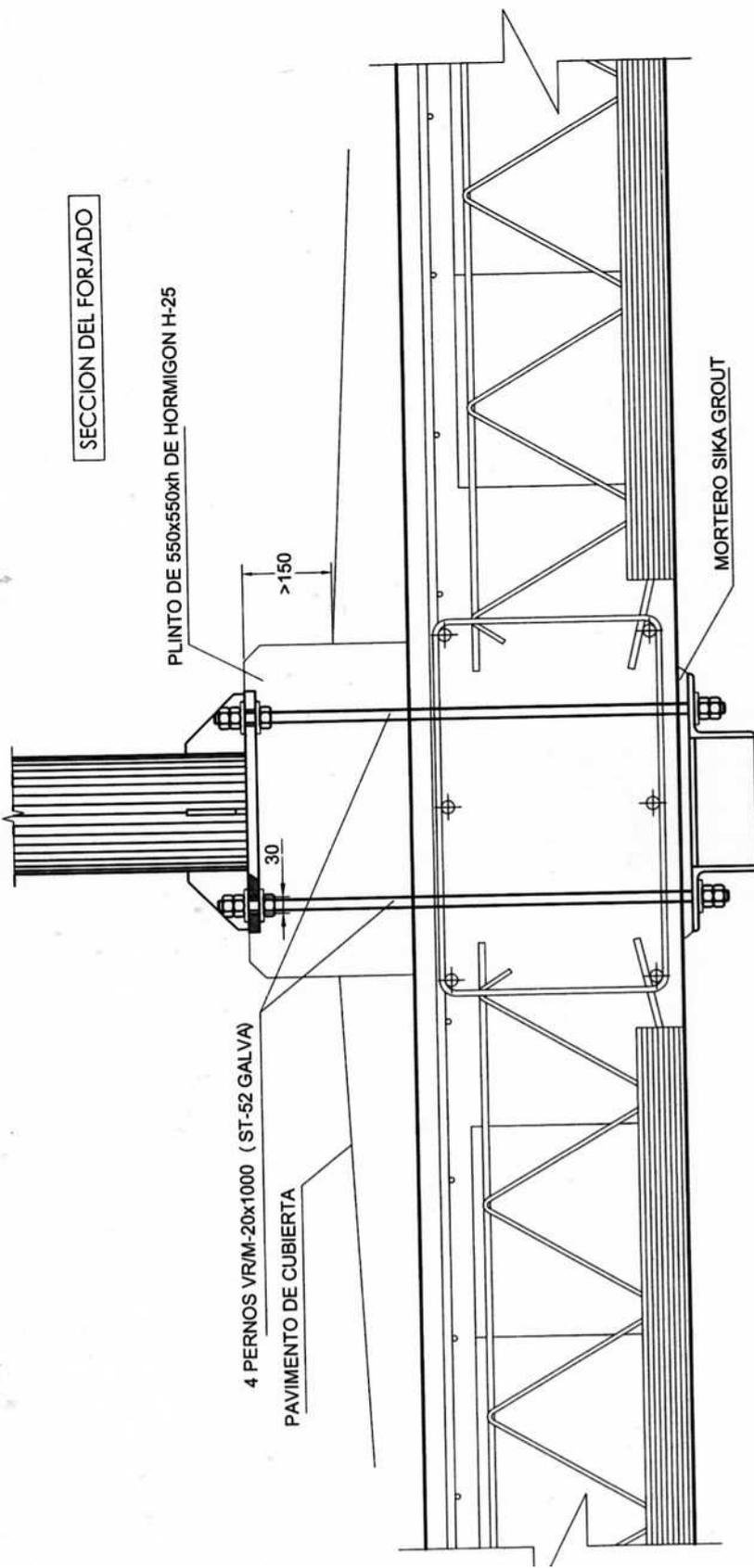
Diseño del mastil de la antena del Radiotelescopio de la
UPCT.



SOPORTE PARA EL RADIO TELESCOPIO

Escala S/C Acero Laminado: S-275 JR

SECCION DEL FORJADO

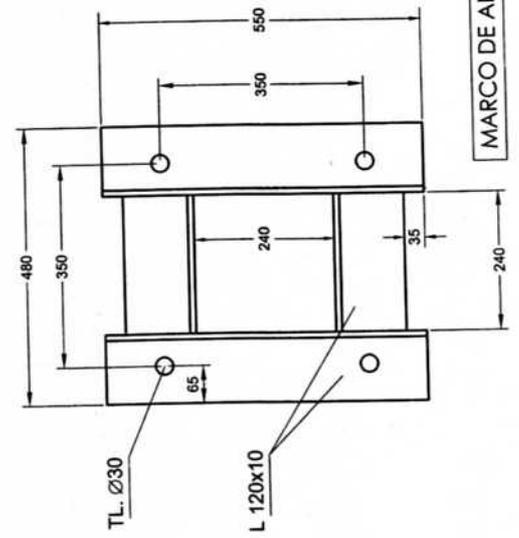


PLINTO DE 550x550xh DE HORMIGON H-25

4 PERNOS VR/M-20x1000 (ST-52 GALVA)

PAVIMENTO DE CUBIERTA

MORTERO SIKA GROUT



TL. Ø30

L 120x10

MARCO DE ANGULARES